

Passeport Innovation

Rapport méthodologique

Validation d'une méthode semi-automatisée de détection des milieux humides à partir du lidar aéroporté

Présenté à :

Société canadienne pour la
conservation de la nature

Joel Bonin, directeur du Québec
Marie-Andrée Tougas-Tellier, chargée de projets
Caroline Gagné, chargée de projets

et

Canards illimités Canada

Bernard Fillion, directeur du Québec
Jason Beaulieu, chef géomatique

et

Ministère de l'Économie, Science et Innovation
Lynne Brochu

Par :



Philippe Bournival ing.f., M.Sc.
Mathieu Varin, géomaticien, M.Sc.
Jean Fink, biol.

Janvier 2017

Mots-clés : étangs vernaux, territoire Kenauk, Outaouais, lidar, image satellitaire à haute résolution spatiale, classification semi-automatisée, milieux humides, photo-interprétation

Référence à citer :

Bournival P., Varin M. et J. Fink. 2017. Validation d'une méthode semi-automatisée de détection des milieux humides à partir du lidar aéroporté. Centre d'enseignement et de recherche en foresterie de Sainte-Foy inc. (CERFO). Rapport 2017-01. 44 pages.

TABLE DES MATIÈRES

RÉSUMÉ.....	1
INTRODUCTION	3
OBJECTIFS ET LIVRABLES	4
1. TERRITOIRES D'ÉTUDE	6
2. MÉTHODE	7
2.1. Données utilisées	7
2.2. Traitement d'images satellitaires à haute résolution spatiale.....	9
2.3. Traitement des données lidar aéroporté.....	11
2.4. Combinaison des produits d'images satellitaires à haute résolution spatiale et du lidar aéroporté	14
2.5. Validation des résultats sur le terrain.....	16
2.6. Compilation et analyses statistiques	16
3. RÉSULTATS	18
3.1. Images satellitaires à haute résolution spatiale	18
3.2. Lidar aéroporté	21
3.3. Identification des étangs vernaux potentiels	27
3.4. Caractéristiques étangs vernaux potentiels	30
3.5. Détection de changement entre les images satellitaires.....	32
3.6. Comparaison entre la photo-interprétation et l'identification automatisée des dépressions.....	33
3.7. Statistiques sur les milieux humides par classe, territoire Kenauk.....	34
4. DISCUSSION	35
4.1. Apports de la méthode	35
4.2. Limites de la méthode	36
4.3. Pistes d'amélioration possibles	38
4.4. Retombées.....	39
CONCLUSION	41
RÉFÉRENCES	42

LISTE DES FIGURES

Figure 1: Carte du territoire d'étude	6
Figure 2 : Carte des plans d'eau classifiés sur la mosaïque d'images satellitaires Pléiades de printemps du territoire Kenauk, par une classification semi-dirigée.....	19
Figure 3 : Carte des plans d'eau classifiés sur la mosaïque d'images satellitaires Pléiades d'été du territoire Kenauk, par une classification semi-dirigée.....	20
Figure 4. Eau peu profonde. a) Image aérienne d'été. b) Image aérienne avec contour de l'eau peu profonde en bleu. C) Image d'intensité du lidar. D) Plan d'eau classifié avec la donnée lidar de l'image intensité (bleu).....	21
Figure 5. A) Eau peu profonde avec le MNT. B) Eau peu profonde avec le MHC. C) Marécage avec le MNT. D) Marécage avec le MHC.....	22
Figure 6. A) Présence d'eau dans les grandes dépressions de l'eau peu profonde. B) Présence d'arbre dans les grandes dépressions de la tourbière boisée.	23
Figure 7. A) Présence d'eau dans les étangs vernaux sur l'image de printemps. B) Absence d'eau dans les étangs vernaux de l'image d'été.....	24
Figure 8. A) Écoulement de l'eau de surface pour une tourbière BOG. B) Écoulement de l'eau de surface pour une tourbière FEN.....	25
Figure 9. Indice d'humidité topographique TWI. A) Étangs vernaux. B) Eau peu profonde	26
Figure 10 : Carte de la répartition des étangs vernaux potentiels.....	28
Figure 11 : Carte de la répartition des étangs vernaux et des milieux humides photo-interprétés	29
Figure 12. Différence NDVI moyen en fonction du type de petits milieux humides.....	32
Figure 13. Différence NDWI max en fonction du type de petits milieux humides.....	33

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1. Caractéristique des images Pléiades	8
Tableau 2 : Informations sur la collecte des données Lidar	8
Tableau 3. Matrice d'erreur de la classification supervisée sur les images de printemps et d'été	18
Tableau 4 : Statistiques des produits sélectionnés par critère pour le territoire complet	27
Tableau 5. Caractéristiques physiques des étangs vernaux	30
Tableau 6. Espèces d'arbres observés dans les étangs vernaux	31
Tableau 7. Type de dépôt et drainage des étangs vernaux	31
Tableau 8. Nombre de milieux humides photo-interprétés avec des dépressions par classe sur le territoire d'étude.....	34
Tableau 9. Statistique d'occupation du sol par les milieux humides sur le territoire Kenauk	34

RÉSUMÉ

Ce projet a permis d'explorer diverses méthodes semi-automatisées de détection de milieux humides en faisant appel à des technologies de pointe en aménagement du territoire, telles que le lidar aéroporté et l'imagerie satellitaire à haute résolution spatiale. Ces technologies ont été utilisées sur deux territoires d'étude pour réaliser la détection des petits et grands milieux humides le long des basses-terres de la rivière des Outaouais. Les produits dérivés du lidar ont d'abord été utilisés comme outils de pré-identification des milieux humides alors que les images satellitaires à haute résolution spatiale ont été utilisées pour le calcul d'indices et pour confirmer la présence ou l'absence d'eau dans les petites dépressions identifiées par le lidar.

L'utilisation combinée du lidar et de l'imagerie satellitaire a permis de réduire avec confiance la taille minimale d'identification des milieux humides jusqu'à 50 m². Inspirés de la littérature de Wu *et al.* 2014, la méthode combinée a également permis de développer de nouveaux critères d'identification des étangs vernaux. Les nouveaux critères ont été développés à partir de la détection de changement entre les images d'été et de printemps. Les différences NDVI moyen et NDWI max ont permis de dissocier significativement les étangs vernaux des autres types de petits milieux humides. La cartographie fine de ces petits milieux humides (moins de 0,1 hectare) a permis d'avoir une meilleure connaissance du nombre, de la taille et de leur répartition sur le territoire et de bonifier la cartographie détaillée de Canards illimités par la création d'une 8^e classe de milieu humide.

Les résultats soulignent que l'utilisation du lidar est essentielle pour bien identifier les milieux humides situés dans les dépressions, mais qu'il n'est pas possible d'identifier ceux situés hors des dépressions. Ces derniers représentent près de la moitié des milieux humides photo-interprétés. Les résultats indiquent qu'il est nécessaire d'utiliser d'autres algorithmes ou d'autres outils que le lidar pour obtenir une meilleure correspondance avec les milieux humides identifiés par photo-interprétation. Les produits lidar développés comprennent les modèles numériques de terrain, de terrain ombré, de surface, de hauteur de canopée, d'humidité topographique, les images d'intensité, l'écoulement de l'eau et les petites et grandes dépressions. Le produit dérivé lidar le plus utilisé par les photos-interprètes a été le modèle numérique de terrain ombré.

Le lidar a permis d'améliorer la délimitation des milieux humides et d'augmenter le niveau de confiance des photo-interprètes. Les petites et grandes dépressions identifiées par la méthode ont été validées par une campagne de terrain. Un total de 88 petits milieux humides identifiés par lidar ont été validés sur le terrain, dont 31 étangs vernaux. Les résultats soulignent l'importance de l'utilisation des images temporelles de printemps et d'été pour dissocier les étangs vernaux des autres classes de 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). Les milieux humides temporaires et permanents constituent des habitats fauniques spécialisés, notamment pour les habitats de reproduction d'invertébrés, d'amphibiens, de reptiles, d'oiseaux et de sauvagines (Calhoun et Klemens, 2002; Lathrop *et al.*, 2005; Whitham *et al.*, 1996). Certaines espèces fauniques en situation précaire sont connues pour habiter ces milieux (Commonwealth of Massachusetts, 2014) ou sont susceptibles de les utiliser (Beaudry *et al.*, 2009).

Le présent projet a permis d'explorer la capacité des nouvelles technologies à réaliser une cartographie fine et plus précise des petits et grands milieux humides de l'Outaouais situé le long des basses-terres du Saint-Laurent. 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 méthode de détection 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), mandataire dans cette étude, désirait cartographier les petits milieux humides sur ses propriétés privées afin de les protéger et de les étudier en vue 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 et le développement d'outils pour les analyses hydrologiques.

OBJECTIFS ET LIVRABLES

Le projet visait à valider une méthode semi-automatisée utilisant le lidar aéroporté pour cartographier les milieux humides de l’Outaouais compris dans les basses-terres du Saint-Laurent. De cet objectif principal découlent plusieurs objectifs spécifiques, soit :

- 1) Valider une approche permettant d’accélérer l’identification des milieux humides sur un grand territoire;
- 2) Valider une méthodologie utilisant les produits dérivés du lidar aéroporté en combinaison avec la photo-interprétation des images aériennes afin d'identifier les grands milieux humides (> 0,1 ha);
- 3) Valider une méthodologie utilisant les produits dérivés du lidar aéroporté en combinaisons avec des images multispectrales satellitaires à haute résolution spatiale afin d'identifier les petits et grands milieux humides (> 0,02 ha);
- 4) Valider les milieux humides préidentifiés avec le lidar et les images multispectrales sur le terrain;
- 5) Contribuer à la formation des étudiants de technologie forestière du Cégep de Sainte-Foy en leur permettant d'effectuer des stages en milieu de travail avec ce projet.

Le principal livrable de ce projet est le transfert technologique des méthodes de détection semi-automatisée des milieux humides à nos partenaires. Parmi les livrables plus techniques, on retrouve :

Livrable 1 : Modèles numériques de terrain, de terrain ombré, de surface et de pente issus du lidar.

Livrable 2 : Données géospatiales des grands milieux humides (> 0,1 ha) potentiels issus de la détection réalisée par le lidar de la partie Outaouais comprise dans les basses-terres du Saint-Laurent.

Livable 3 : Modèles dérivés des données géospatiales (indice topographique d'humidité des milieux humides, réseau hydrologique et écoulements de l'eau).

Livable 4 : Données géospatiales de la détection de changement entre les images de printemps et d'été pour les petits milieux humides du territoire Kenauk en Outaouais.

Livable 5 : Données géospatiales des petits et grands milieux humides (> 0,02 ha) potentiels issues de la détection réalisée par le lidar du territoire Kenauk en Outaouais.

Livable 6 : Base de données terrain des petits et grands milieux humides du territoire Kenauk et des grands milieux humides de la partie Outaouais comprise dans les basses-terres du Saint-Laurent.

Livable 7 : Rapport synthèse sur la méthodologie et les résultats de la méthode.

Livable 8 : Diffusion des connaissances sous forme de sessions d'information.

1. TERRITOIRES D'ÉTUDE

Le territoire d'étude est divisé en deux parties. La partie est (356 km²), située sur le territoire Kenauk en Outaouais, a servi de territoire pilote pour la détection des petits et grands milieux humides (> 0,02 ha) alors que la partie ouest (3 380 km²), caractérisée par les Basse-Terre du Saint-Laurent, a servi de territoire pilote pour la détection des grands milieux humides (> 0,1 ha). Dans la partie ouest, le lidar aéroporté a été utilisé seul alors qu'il a été combiné à l'imagerie satellitaire à haute résolution spatiale pour la partie est (figure 1). Au total, le territoire d'étude est de 3 736 km².

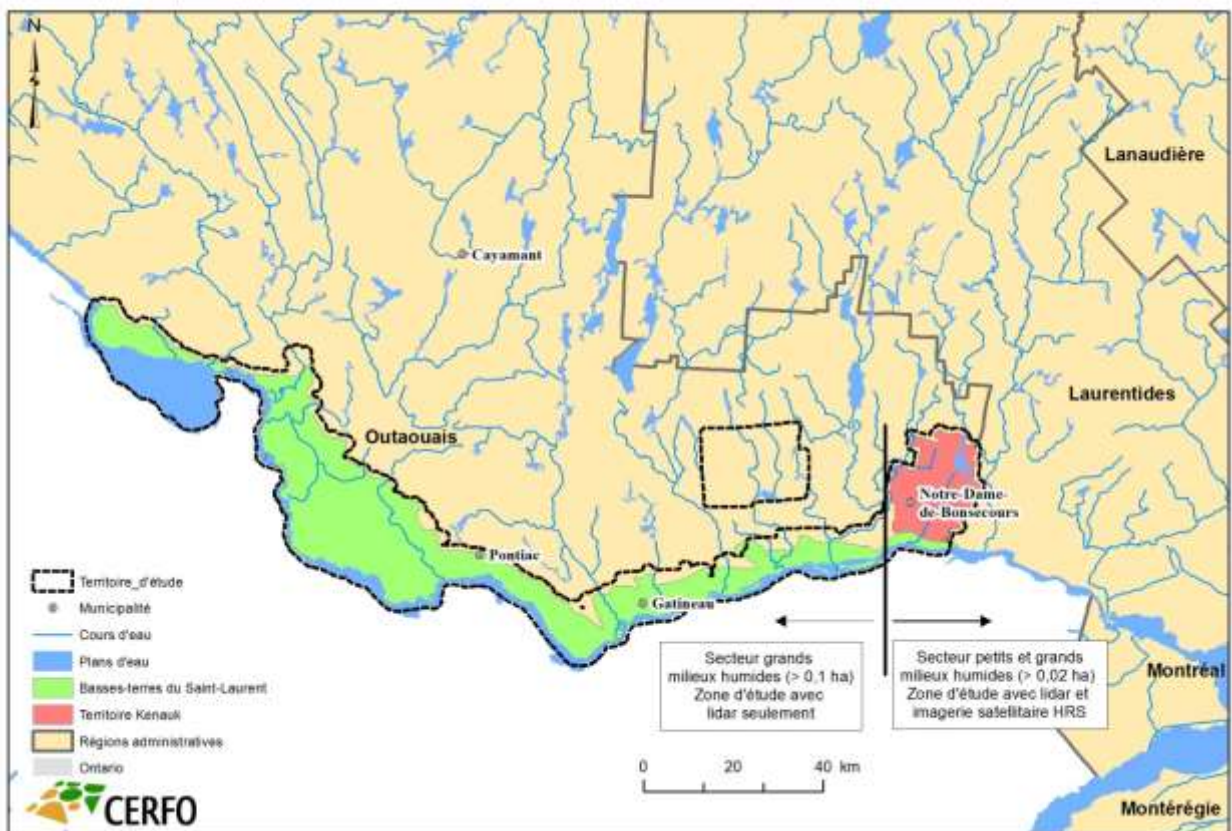


Figure 1: Carte du territoire d'étude

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 effectuer la détection des petits et grands milieux humides. Le premier jeu de données a servi à extraire l'information hydrique printanière et estivale du territoire Kenauk en Outaouais et le second a permis de délimiter les dépressions sur tout le territoire d'étude et de confirmer la présence d'eau dans les grandes dépressions. Des données auxiliaires ont également été utilisées pour valider ou pour compléter les analyses.

2.1.1. Images satellitaires à haute résolution spatiale

Deux images satellitaires à haute résolution spatiale provenant des satellites Pléiades ont été acquises le 6 mai et le 15 septembre 2015 (tableau 1). D'une résolution spatiale de 50 cm, les images distribuées par Spot Image ont été acquises par l'intermédiaire de l'entreprise Effigis Géo-Solution. Les prétraitements de base tels que les corrections radiométriques, la fusion, l'orthorectification et le mosaïquage ont été effectués à l'aide du logiciel de PCI Geomatica. Les modèles orbitaux ont été utilisés pour effectuer la correction géométrique des images et le modèle numérique de terrain du lidar a été utilisé pour réaliser l'orthorectification des images. Une fois ces prétraitements réalisés, les canaux du rouge, vert, bleu et proche infrarouge (RVB-PIR) ont été utilisés pour produire les indices spectraux NDVI « Normalized Difference Vegetation Index » et NDWI « Normalized Difference Water Index » pour effectuer la classification de l'eau au printemps et en été. Le NDVI et le NDWI ont été calculés de la façon suivante :

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

$$NDWI = \frac{Canal\ V - Canal\ PIR}{Canal\ V + Canal\ PIR}$$

où PIR, R et V sont, respectivement, les canaux spectraux du proche infrarouge, du rouge et du vert. L'acquisition printanière des images a permis d'obtenir un produit sans feuille qui permet de mieux voir le sol et la présence d'eau sous la canopée forestière.

Tableau 1. Caractéristique des images Pléiades

Caractéristiques des images		
Date	Heure	Résolution spatiale
6 mai 2015	12h10	50 cm x 50 cm
15 septembre 2015	15h56	50 cm x 50 cm
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 8, 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

¹ Mesurée par rapport au niveau du sol.

2.1.3. Données auxiliaires

Les données du réseau hydrologique linéaire et surfacique provenant du Cadre de référence hydrologique du Québec (CRHQ), de la Base de données topographique du Québec (BDTQ) et du Système d'informations écoforestières (SIEF : 3^e 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 (Reif *et al.*, 2009). Quant aux données linéaires, les cours d'eau intermittents ont été retirés de l'analyse, car un étang vernal pouvait y être attaché. Une vérification visuelle a été effectuée pour s'assurer que les données auxiliaires étaient à jour.

2.2. SYSTÈME DE CLASSIFICATION UTILISÉ POUR LES MILIEUX HUMIDES

Le système de classification utilisé pour l'inventaire des milieux humides est basé sur les cinq grandes classes du Système de classification des terres humides du Canada (GTNTH 1997). Les classes de ce système sont : les eaux peu profondes, les marais, les marécages, les tourbières ombrotrophes (bogs) et les tourbières minérotrophes (fens). Les sous-classes prairie humide, tourbière boisée et étangs vernaux ont été ajoutées aux classes marais, tourbières et marécages pour compléter le système de classification. Pour plus de détails sur la définition de chacune de ces classes, il est possible de consulter le rapport de Canards Illimités Canada et du ministère Développement durable et de la Lutte contre les changements climatiques 2017. Pour les étangs vernaux, ils sont définis comme étant un milieu humide temporaire situé dans une dépression peu profonde, isolé du réseau hydrographique, sans présence de poissons et qui s'assèche périodiquement à la fin de l'été, mais dont l'hydropériode minimale est de 2 mois. Ce dernier caractère est essentiel pour supporter le stade larvaire et la métamorphose des amphibiens (Pressier *et al.* 2000, Brooks, 2004 et Marchand, 2016).

2.3. TRAITEMENT D'IMAGES SATELLITAIRES À HAUTE RÉOLUTION SPATIALE

L'approche par classification semi-dirigée par pixel a été privilégiée pour documenter le réseau hydrique printanier et estival. Cette approche consiste à collecter des zones homogènes de pixels et à leur attribuer une classe. Les signatures spectrales de l'image printanière ont été sauvegardées et importées pour réaliser la classification de l'image d'été. Des sites

d'entraînement ont été ajoutés pour l'eau et l'ombre sur l'image d'été afin d'améliorer la classification.

2.3.1. Identification des zones d'entraînement

Une délimitation des zones d'entraînement servant à produire la classification semi-dirigée de la mosaïque d'images a été effectuée. Il s'agissait d'identifier des zones homogènes représentant l'eau et les autres classes sur la mosaïque d'images. 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 préférentiellement une superficie minimale de 60 m² et être réparties uniformément sur l'ensemble du territoire d'étude. Ainsi, les classes suivantes ont été retenues :

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

La catégorie autre classe sert à déterminer tout ce qui n'est pas de l'eau. Cette classe a été divisée en quatre sous-classes (résineux, feuillu, sol et végétation basse) afin de documenter les sources de confusion avec l'eau. Un total de 111 sites d'entraînement a été utilisé pour effectuer la classification.

2.3.2. Analyse spectrale des zones d'entraînement

L'analyse des signatures spectrales des zones d'entraînement a été évaluée en fonction de leur séparabilité spectrale. L'indice de *Bhattacharyya* de *PCI Geomatica* a été utilisé pour effectuer cette évaluation. Cette analyse a donc permis de déterminer si les classes associées à ces zones d'entraînement se distinguent bien les unes des autres.

2.3.3. Assignment des classes d'occupation

La classification des pixels a été réalisée avec l'algorithme de classification semi-dirigée par maximum de vraisemblance. Cet algorithme analyse les pixels afin d'y déceler des tendances spectrales. En effet, à partir des pixels 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 pixel. Les indices spectraux NDVI et NDWI ont été utilisés en plus de canaux RVB-PIR pour effectuer la classification.

2.4. TRAITEMENT DES DONNÉES LIDAR AÉROPORTÉ

Les données lidar ont été traitées à l'aide d'*ArcGIS* (ESRI, 2013) et d'outils hydrologiques de *QGIS* (QGIS Development Team, 2009). Les données brutes, en format .las, ont fait l'objet d'une interpolation afin de créer les différents produits dérivés du lidar. Les images d'intensité, les modèles numériques de terrain, de terrain ombré, de hauteur de canopée, la création des dépressions, l'écoulement de l'eau potentiel et l'humidité topographique sont au nombre des autres produits développés.

2.4.1. L'image d'intensité

L'intensité est mesurée et captée pour chaque point lidar, elle représente la force du signal retourné par la surface de contact. Plus précisément, il s'agit de l'amplitude du signal retourné et de l'intensité de la rétrodiffusion. Cette réflexion est fonction de la longueur d'onde utilisée, le proche infrarouge dans ce cas-ci (1064 nm,) ce qui influence l'information captée selon la surface étudiée. Dans le cas d'une image d'intensité, toutes les classes, mais seuls les premiers retours ont été sélectionnés afin de représenter tous les éléments sur le territoire. La méthode d'interpolation du plus proche voisin a été utilisée. L'image d'intensité a été utilisée pour inférer la proportion d'eau de chacune des grandes dépressions pour les deux territoires d'étude. Une normalisation radiométrique par seuillage a dû être effectuée pour corriger l'effet du contexte atmosphérique de la prise de données.

2.4.2. Modèle numérique de terrain (MNT)

Le MNT a été généré à partir des données brutes du lidar. En fonction de l'espacement moyen² et de la densité³ des points altimétriques, une résolution spatiale a été proposée. En fait, 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

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 s'estime comme suit : $1/EM^2$.

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 a été utilisée pour éviter les trouées. 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 recherche 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 morphologique median (7 x 7 pixel) a été appliqué sur tout le territoire afin de corriger les irrégularités du terrain causées par l'absence de point et la méthode d'interpolation. Cela a pour effet d'atténuer les fausses représentations des petites dépressions qui pourraient correspondre à des anomalies d'interpolation (Wu *et al.*, 2014). Une fois les MNT complétés, les MNT ombrés ont été produits pour une meilleure visualisation.

2.4.3. 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 détection*), 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. Les grandes dépressions (> 0,1 ha) ont été créées pour la partie avec lidar seulement alors que les grandes et les petites dépressions ont été générées pour le secteur avec lidar et imagerie satellitaire.

2.4.4. Modèle de hauteur de canopée (MHC)

Le MHC a été créé en effectuant une soustraction entre le modèle numérique de surface (MNS) et le MNT. Le MNS a été calculé de la même façon que le MNT, mais en prenant seulement les points de végétation, en sélectionnant tous les retours et en utilisant la valeur maximale au lieu de la valeur minimale pour chacune des cellules. Les valeurs extrêmes du MHC ont été corrigées.

Par la suite, les valeurs de hauteurs de canopée ont été inférées à la délimitation des grandes dépressions afin de calculer des statistiques de végétation par classe de hauteur.

2.4.5. Écoulement de l'eau

L'écoulement de l'eau correspond au potentiel du MNT à accumuler un flux hydrologique. Cette accumulation est produite à partir du calcul de la direction des flux. Plus précisément, plus le relief du terrain conduit à des enclaves aigües, plus la zone aura le potentiel d'accumuler de l'eau. L'écoulement de l'eau est calculé en fonction du nombre de pixels (cellules) qui peuvent s'accumuler ou se drainer dans un pixel. Concrètement, il s'agit de la surface drainée en amont de chaque pixel. L'écoulement de l'eau se retrouvera donc généralement dans des fonds de vallées. Avant de réaliser les produits nécessaires pour obtenir l'écoulement de l'eau, les cuvettes ont été remplies. Ensuite, des modèles de direction des flux et d'accumulation de flux ont été créés afin de documenter les flux d'eau potentiels. Ce résultat a été classifié afin simplifier la donnée et de produire un réseau d'écoulement potentiel. Un ordre de *Strahler* a par la suite été calculé afin d'ajouter une information sur le nombre de ramifications de chacun des cours d'eau.

2.4.6. L'humidité topographique (TWI)

L'indice topographique d'humidité (*Topographic Wetness Index – TWI*) tient compte des pentes du territoire et de ses aires contributrices. Il s'agit donc d'une adaptation de l'accumulation des flux en fonction du MNT. Une valeur résultante élevée représente des dépressions drainant l'écoulement d'eau, ce qui indique des zones plus humides. L'équation générale utilisée est la suivante :

$$TWI = \ln (a/\tan(b))$$

a est l'aire contributrice en m²

b est la pente en radian

Les pentes en radian ont été calculées à partir du MNT généré précédemment. Le calcul de l'aire contributrice a été effectué à partir de l'accumulation des flux calculés lors de l'étape de l'écoulement de l'eau, mais a été converti en m² pour les besoins du calcul. Une fois les variables a et b calculés, la calculatrice raster a été utilisée pour générer le résultat. Un filtre spatial et une normalisation des valeurs ont été appliqués afin de faciliter la visualisation et le classement.

2.5. COMBINAISON DES PRODUITS D'IMAGES SATELLITAIRES À HAUTE RÉOLUTION SPATIALE ET DU LIDAR AÉROPORTÉ

La combinaison des produits d'images satellitaires à haute résolution spatiale et du lidar aéroporté a permis de faire une sélection spécifique afin d'obtenir les étangs vernaux 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 croisés avec l'analyse hydrique des images multispectrales afin de s'assurer que les dépressions avaient une présence d'eau au printemps et une absence d'eau en été. La donnée de l'eau des images satellitaires à haute résolution spatiale de printemps et d'été a été préférée à celle du lidar puisqu'elle est plus précise (50 cm au lieu de 1m) et qu'elle permet la comparaison temporelle sur un même produit. Cet aspect temporel constitue une avancée technologique importante par rapport à l'étude de Varin *et al.* (2016). La section suivante décrit les huit critères de sélection utilisés pour discriminer la présence des étangs vernaux potentiels.

2.5.1. 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 inclut tous les MH de plus de 5000 m² (0,5 ha) dont certains polygones avec une superficie plus petite variant entre 1000 m² et 5000 m² alors que Julian *et al.* (2008) considèrent que les étangs vernaux peuvent être constitués d'une dépression jusqu'à 50 m². Il est donc suggéré de considérer les dépressions entre 50 et 1000 m².

Le second critère de sélection a permis de raffiner le nombre de dépressions en retirant celles qui étaient connectées au réseau hydrologique permanent. 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). En plus du réseau hydrologique linéaire et surfacique permanent, la cartographie détaillée des milieux humides de Canards illimités a été utilisée pour renforcer le critère d'isolement.

Le troisième critère de sélection a permis de conserver les dépressions où la différence d'altitude entre les points maximale et minimale permettait d'avoir une profondeur assez grande pour 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 plus de 0,1 m ont été gardées. Le critère de la borne supérieur n'a pas été gardé puisque le calcul de la profondeur ne fait pas référence à la profondeur de l'eau, mais bel et bien la profondeur de la dépression pouvant accumuler de l'eau.

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.* (2014) qui s'est 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 m².

Le cinquième critère de sélection est le croisement entre les produits d'images multispectrales printanières et du lidar. La classe de l'eau libre issue de la classification semi-dirigée a servi pour déterminer si la dépression avait une présence d'eau au printemps.

Le sixième critère de sélection consiste à retirer des tous les étangs vernaux potentiels qui présentaient encore de l'eau sur l'image d'été. La classification semi-dirigée a été utilisée pour déterminer l'absence d'eau dans les dépressions estivales. Cette étape marquait la fin du processus normal de sélection des étangs vernaux tel que décrit dans Varin *et al.* (2016), mais deux autres critères inspirés des travaux Wu *et al.* 2014 ont été rajoutés pour identifier les étangs vernaux d'importance.

Le septième critère a été conçu à partir de la détection de changement entre l'image de printemps et l'image d'été. Il consiste à étudier la différence de l'activité photosynthétique de la végétation entre les deux images pour la moyenne des pixels présents dans la dépression. L'activité photosynthétique de la végétation a été calculée à partir de l'indice NDVI (Normalized Difference Vegetation Index).

Le huitième critère a été utilisé pour renforcer la méthode de sélection des étangs vernaux d'importance. Également inspirés des travaux de Wu *et al.* 2014, il consiste à étudier les variations du pixel le plus humide de la dépression entre les images de printemps et d'été. Plus précisément, le critère du NDWI (Normalized Difference Water Index) caractérise l'eau contenue dans la végétation.

2.6. 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 aux mois de mai et juin 2015 par l'équipe affectée au projet, soit un technicien forestier et un étudiant du CÉGEP de Sainte-Foy. L'échantillonnage a été effectué à partir des résultats de l'analyse hydrique réalisée sur les images satellitaires. L'objectif principal de la campagne de terrain était de valider la présence des étangs vernaux, mais aussi de caractériser les étangs en notant des informations sur leur alimentation en eau, le type dépôt, le drainage, la profondeur de l'étang, le type de peuplement forestier, arbustif et non ligneux environnant et le type de milieu humide. De plus, les étangs vernaux non identifiés par les critères de sélection ont été notés et localisés par des points GPS sur le terrain afin de comparer et de calibrer les résultats découlant des critères de sélection. Un total de 88 petits milieux humides a été caractérisé, dont 31 étangs vernaux, 30 eaux peu profondes, 14 marécages, 7 marais, 4 tourbières et 2 prairies humides.

2.7. 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 validés provenant des analyses hydriques et des dépressions ont été comparés entre eux afin de documenter leurs caractéristiques physiques. Pour les

différences entre les images d'été et de printemps, représentées par les indices spectraux NDVI moyen et NDWI max, des analyses de variance (ANOVA) ont été effectuées avec la procédure « MIXED ». Les analyses ont tenu compte de la disposition aléatoire des échantillons. Cette procédure a permis de mettre en lumière les effets fixes (type de milieu humide) et de paramétrer les seuillages des indices pour l'identification des étangs vernaux. La procédure « LSD » a complété l'analyse de variance et a permis de déterminer s'il y avait des différences significatives entre les divers types de milieux humides étudiés (seuil $\alpha = 5 \%$).

3. RÉSULTATS

Les résultats de la classification semi-dirigée, l'identification des dépressions avec le lidar, l'identification des étangs vernaux potentiels, la caractérisation biophysique des étangs vernaux et la comparaison des méthodes d'identification sont décrits dans les sections suivantes.

3.1. IMAGES SATELLITAIRES À HAUTE RÉOLUTION SPATIALE

La classification semi-dirigée a été utilisée pour identifier de façon automatisée la présence ou l'absence d'eau dans les petites dépressions (étangs vernaux). Dans un premier temps, la distance de Bhattacharya a été utilisée comme outil de préclassification pour documenter la séparabilité spectrale des classes d'occupation du sol des images d'été et de printemps. Ensuite, la matrice de confusion a été utilisée pour évaluer la qualité de la classification à discriminer l'eau des autres classes. D'ordre général, la séparabilité entre les classes était excellente sur les deux images. La séparabilité moyenne de l'image de printemps est de 98 % et celle de l'image d'été est de 93 % (tableau 3). La séparabilité la plus basse a été observée sur l'image d'été, entre les classes de l'eau libre et de l'ombre. Dans ce cas précis, 9 % de la confusion de l'ombre provient de l'eau libre. À l'inverse, seulement 3 % de l'eau libre est confondu avec de l'ombre. Ce résultat indique que l'eau libre est très bien classée, mais qu'il peut y avoir parfois de l'eau libre dans l'ombre. Les figures 2 et 3 permettent d'apprécier le résultat de la classification automatisée de l'eau sur l'image de printemps et d'été. Ces résultats permettent d'apprécier la correspondance avec les lacs et les milieux humides et de mettre à jour l'hydrographie du territoire d'étude en entier.

Tableau 3. Matrice de confusion de la classification semi-dirigée sur les images de printemps et d'été

Image de printemps

Classes	Résineux	Végétation basse	Ombre	Sol	Eau libre
Eau libre	1%	0%	1%	0%	98%
Ombre	3%	0%	96%	0%	0%

Kappa	Séparabilité moyenne
0.99	98%

Image d'été

Classes	Résineux	Végétation basse	Ombre	Sol	Eau libre
Eau libre	0%	0%	3%	0%	97%
Ombre	1%	0%	90%	0%	9%

Kappa	Séparabilité moyenne
0.96	93%

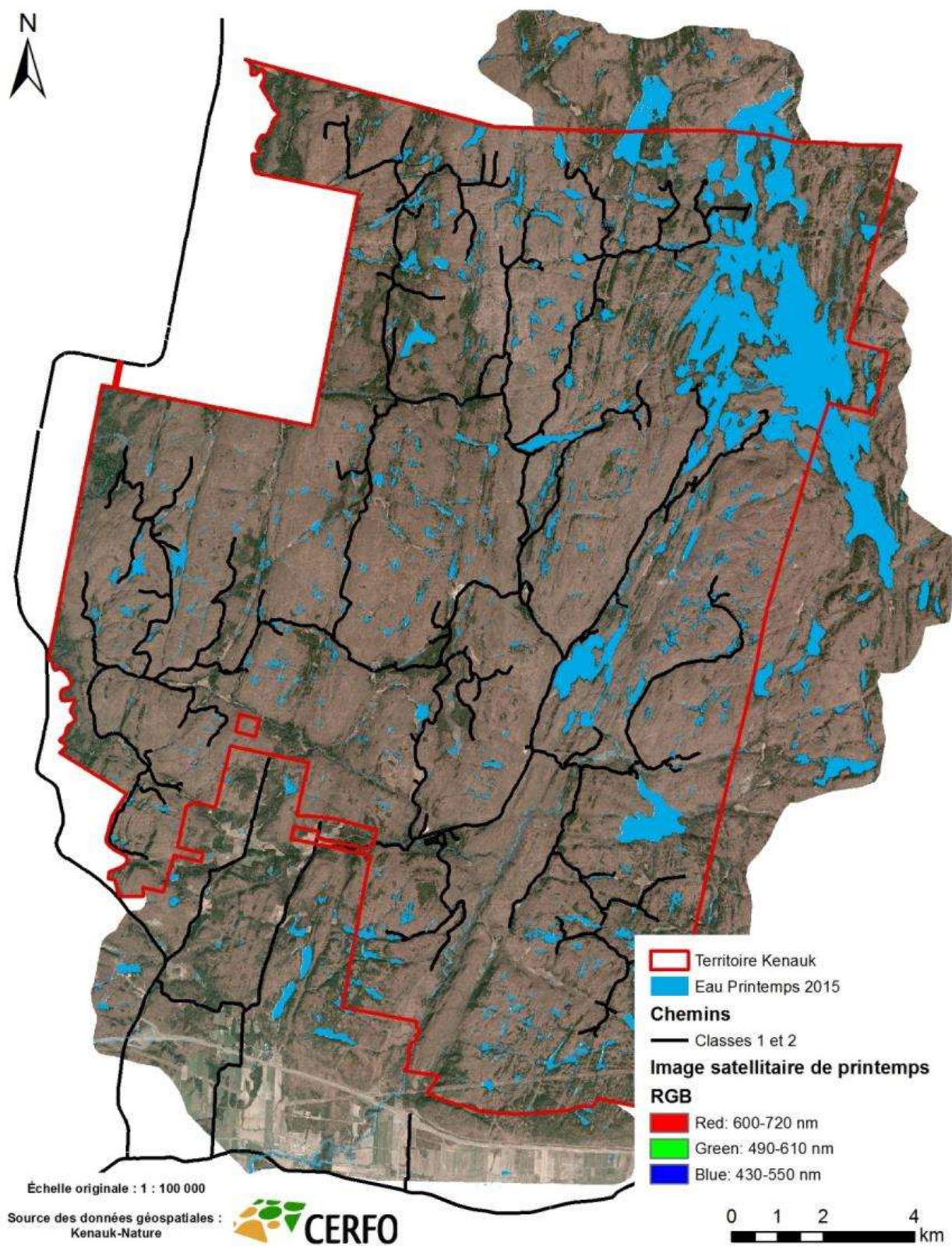


Figure 2 : Carte des plans d'eau classifiés sur la mosaïque d'images satellitaires Pléiades de printemps du territoire Kenauk, par une classification semi-dirigée

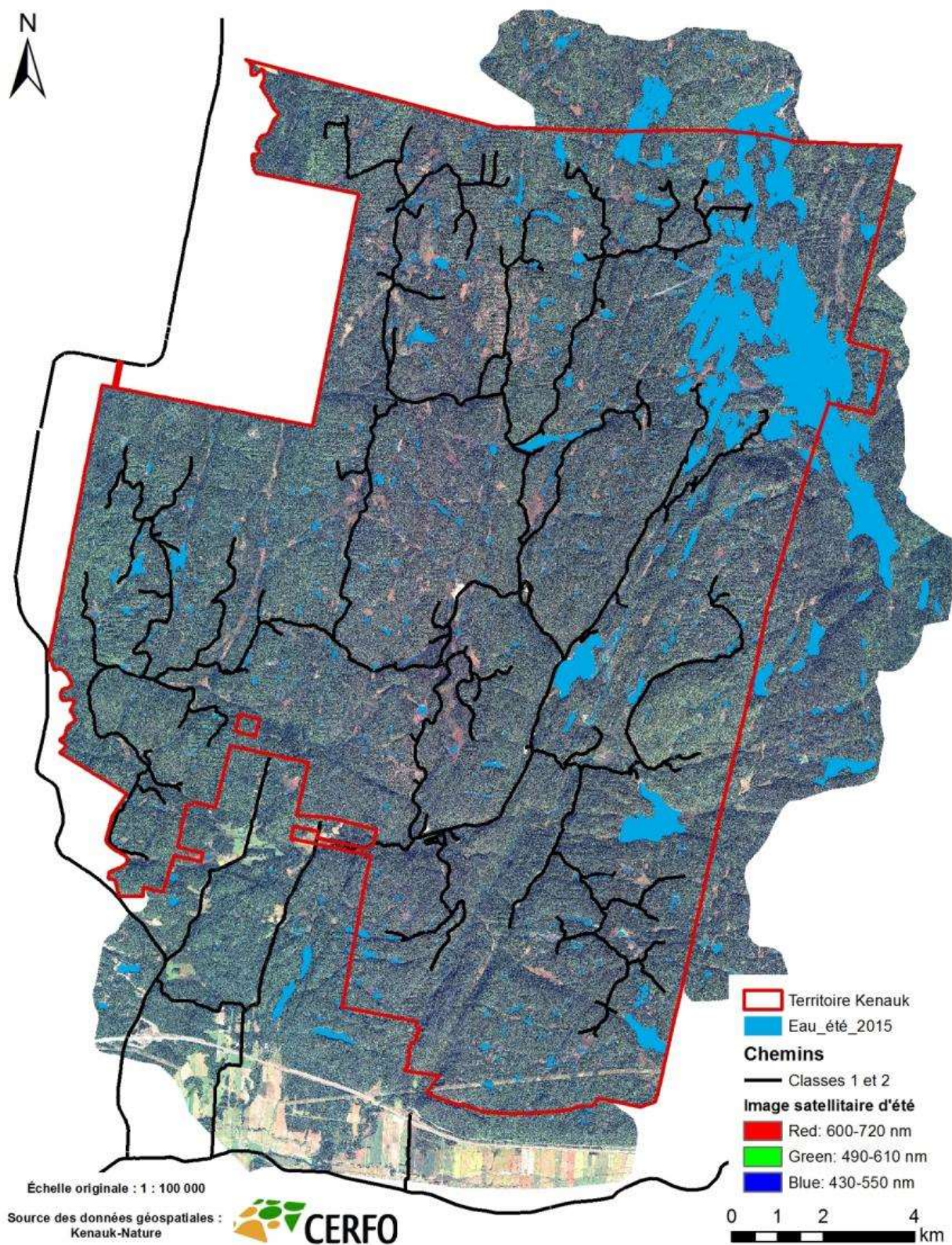


Figure 3 : Carte des plans d'eau classifiés sur la mosaïque d'images satellitaires Pléiades d'été du territoire Kenauk, par une classification semi-dirigée

3.2. LIDAR AÉROPORTÉ

Les produits dérivés lidar de l'image d'intensité, du MNT, des dépressions, de l'écoulement de l'eau et du TWI sont présentés dans les sections suivantes en lien avec la cartographie de Canards illimités et les étangs vernaux.

3.2.1. Image d'intensité et identification automatisée de l'eau

L'image intensité a été utilisée pour inférer la proportion d'eau dans les milieux humides. Une fois calculée, la proportion d'eau a été ajoutée à la donnée géospatiale des grandes dépressions. La figure 4 illustre un exemple d'eau peu profonde (A). Les contours en bleus indiquent les lignes de photo-interprétation (B). L'image C illustre un exemple de l'image d'intensité lidar alors que l'image D permet d'apprécier le résultat de la classification semi-dirigée de l'eau présente dans l'eau peu profonde.

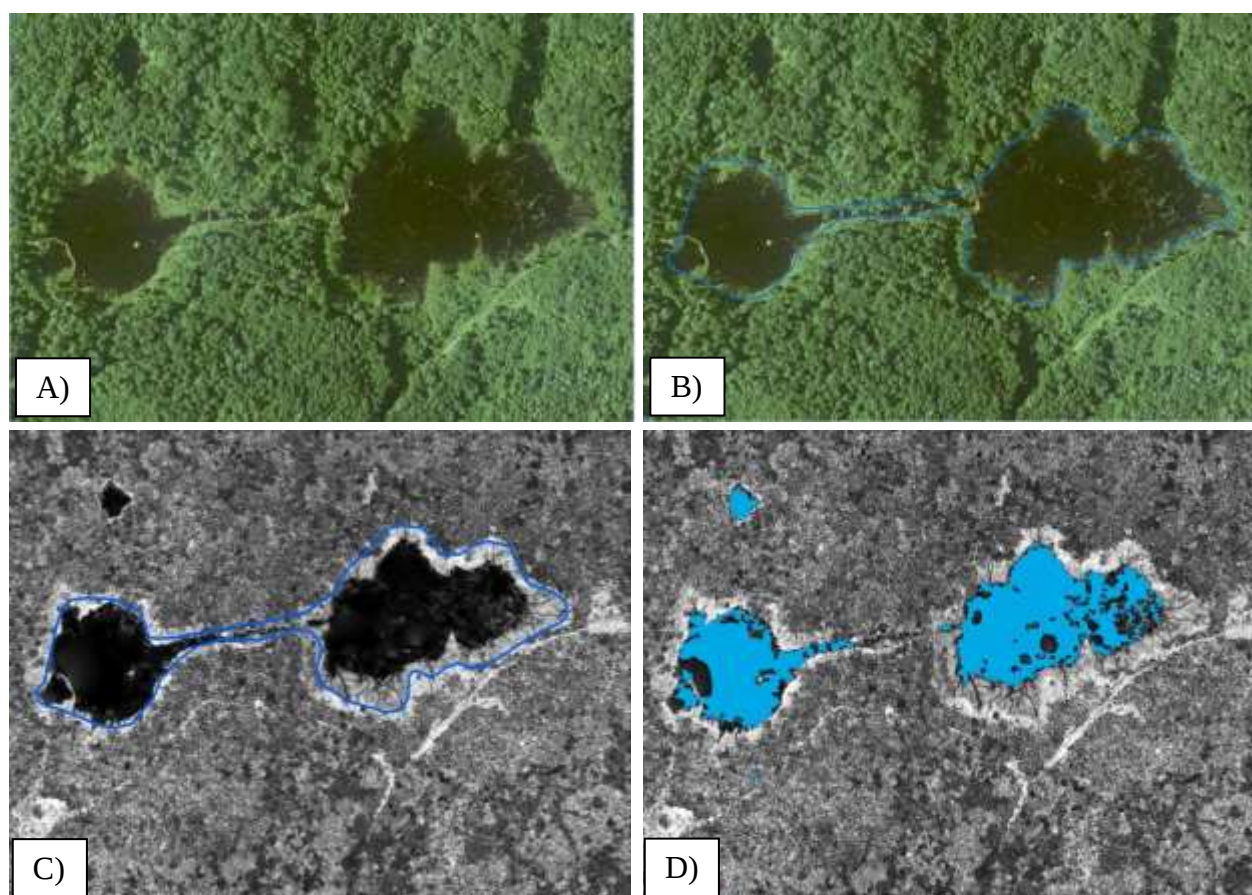


Figure 4. Eau peu profonde. a) Image aérienne d'été. b) Image aérienne avec contour de l'eau peu profonde en bleu. c) Image d'intensité du lidar. D) Plan d'eau classifié avec la donnée lidar de l'image intensité (bleu)

3.2.2. Modèle numérique de terrain et modèle de hauteur de canopée

Les MNT et MHC ont été utilisés pour bonifier le travail des photo-interprètes. La figure 5 illustre un exemple de ces modèles pour l'eau peu profonde en a) et b) alors que les images c) et d) présente un exemple de marécage. Les résultats soulignent les différences entre l'eau peu profonde et les marécages par la présence importante d'arbres sur le MHC et la forme moins régulière de celui-ci. Elle souligne également la difficulté à identifier la présence de marécage à partir de ces deux produits dérivés seulement alors que l'eau peu profonde est beaucoup plus facile à déduire sur ces deux produits.

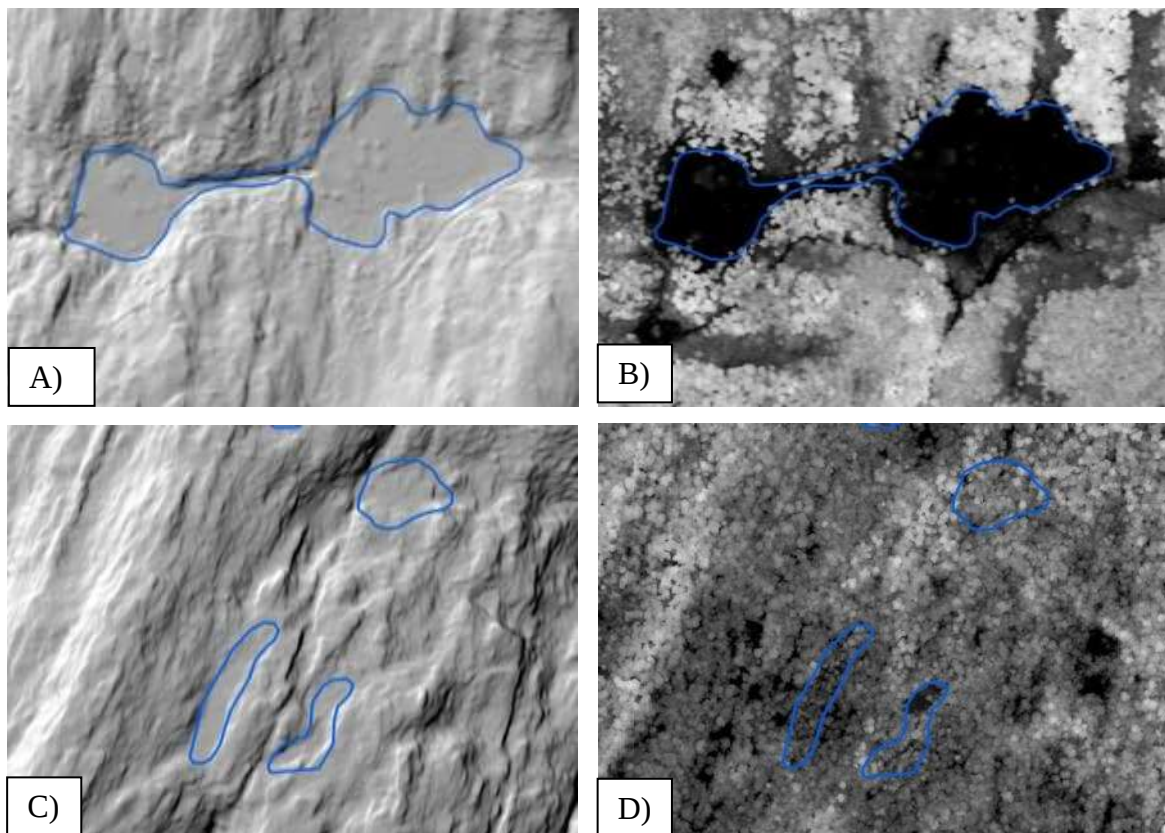


Figure 5. A) Eau peu profonde avec le MNT. B) Eau peu profonde avec le MHC. C) Marécage avec le MNT. D) Marécage avec le MHC

3.2.3. Identification automatisée des dépressions

Le MNT a été utilisé pour créer les petites et les grandes dépressions de façon automatisée. Pour les grandes dépressions, des statistiques de hauteur de canopée par classe de hauteur ainsi que la proportion d'eau à l'intérieur des polygones ont été inférées aux polygones pour bonifier le travail des photo-interprètes. Les classes de hauteur H1, H2, H3 et H4 indiquent des hauteurs respectives de 0 à 1 m, 1 à 2 m, 2 à 4 m et 4 m et plus. Cela revêt d'une grande importance pour

les photo-interprètes, particulièrement dans le cas des tourbières boisées et des tourbières ouvertes où la proportion d'arbres de 4 m et plus est importante. La figure 6 est un bel exemple d'identification des grandes dépressions pour l'eau peu profonde (A) et une tourbière boisée (B). Les dépressions 3233 et 3246 de l'image a) ont respectivement une proportion de 71 % et de 58 % d'eau (bleu) alors qu'elles ont moins de 5 % de hauteur H2, H3 et H4. Ce qui indique la présence potentielle d'eau peu profonde. L'image B indique une proportion d'eau de 1% et une proportion de hauteur H4 de 96 (rouge). Ce qui indique la présence d'un milieu humide boisé.

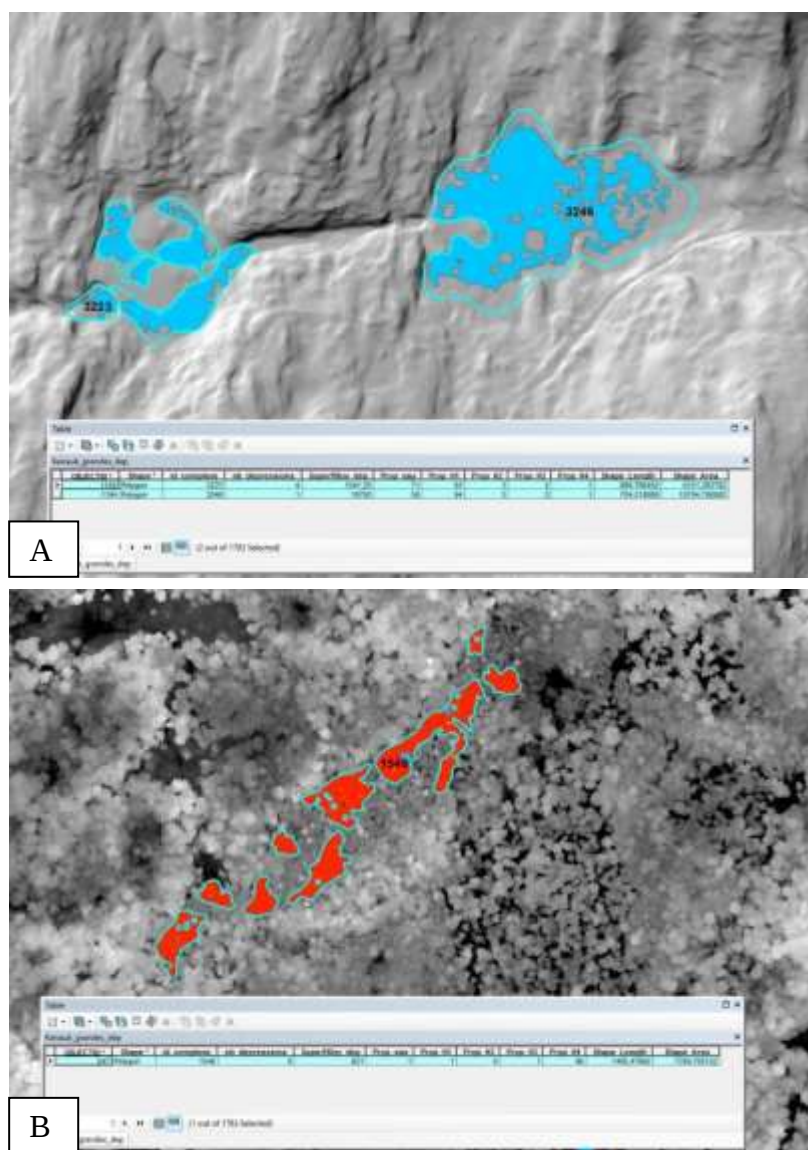


Figure 6. A) Présence d'eau dans les grandes dépressions de l'eau peu profonde. B) Présence d'arbre dans les grandes dépressions de la tourbière boisée.

La donnée géospatiale des petites dépressions (< 0,1 ha) a été générée de la même façon que celle des grandes dépressions à l'exception que les statistiques sur la présence d'eau au printemps et l'absence d'eau en été ont été inférées à partir des images satellitaires à haute résolution spatiale. La présence d'un seul pixel d'eau était nécessaire pour confirmer la présence d'eau dans les petites dépressions. La figure 7 illustre les différences entre les images de printemps et d'été. Elle permet d'apprécier l'absence d'eau en été pour ces deux étangs vernaux confirmés de même que l'importance de la fermeture de la canopée en été.

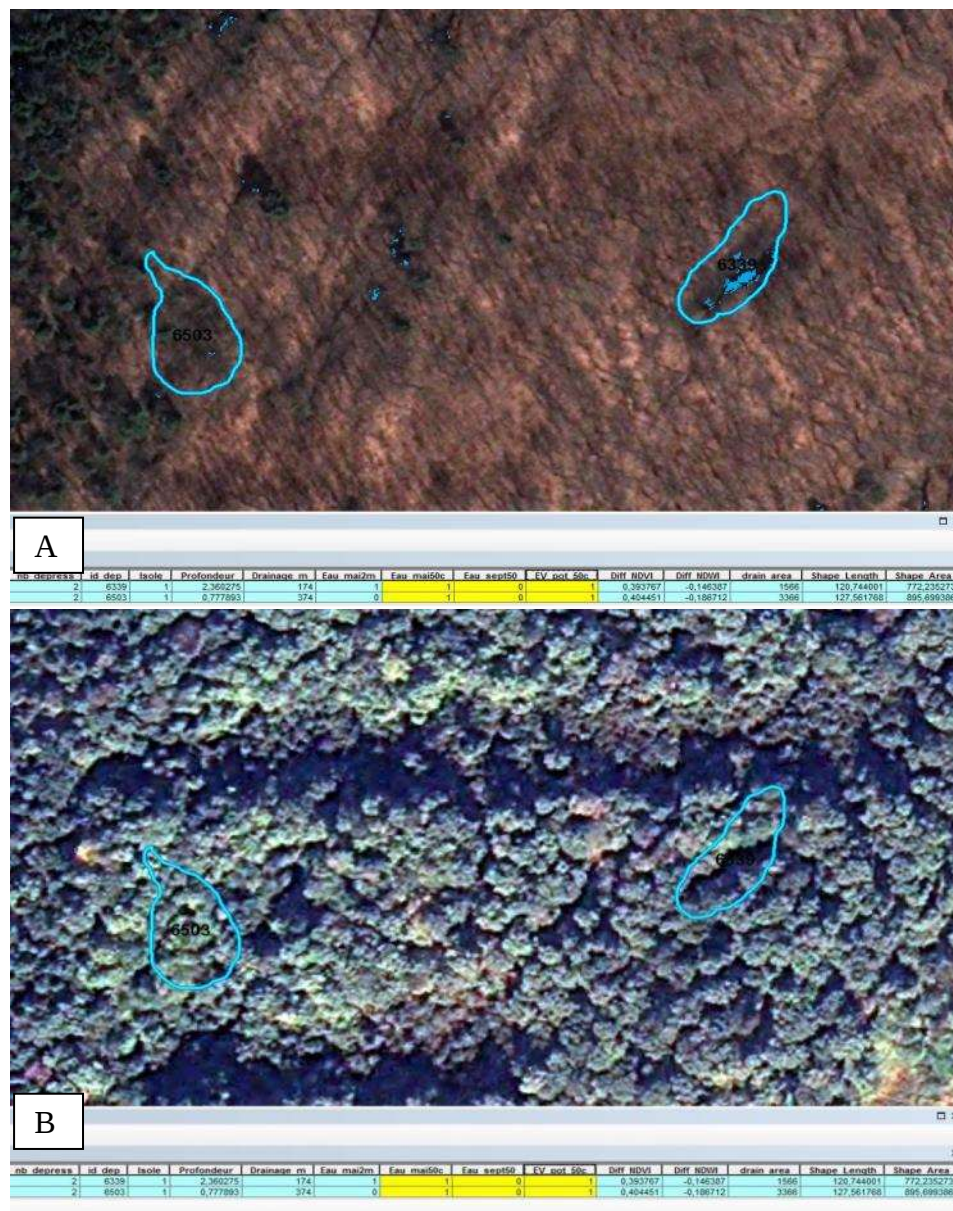


Figure 7. A) Présence d'eau dans les étangs vernaux sur l'image de printemps. B) Absence d'eau dans les étangs vernaux de l'image d'été

3.2.4. Écoulement de l'eau

L'écoulement de l'eau a été généré de façon automatisée pour compléter le réseau hydrologique linéaire du CRHQ et de la BDTQ afin de documenter l'alimentation potentielle en eau de surface des milieux humides. Il a également servi au calcul de l'aire de drainage des étangs vernaux. La figure 8 illustre des exemples d'alimentation en eau pour les tourbières. L'image A indique une présence de tourbière ombrotrophe (BOG) non alimentée par le réseau hydrologique linéaire du CRHQ, mais l'est par l'écoulement de surface issu du lidar. L'image B est un exemple de tourbière minérotrophe (FEN) pour laquelle l'écoulement de surface lidar (mauve) alimente le réseau hydrologique linéaire CRHQ (ligne bleue). Le magenta permet d'apprécier les ramifications de l'écoulement de surface de l'image B.

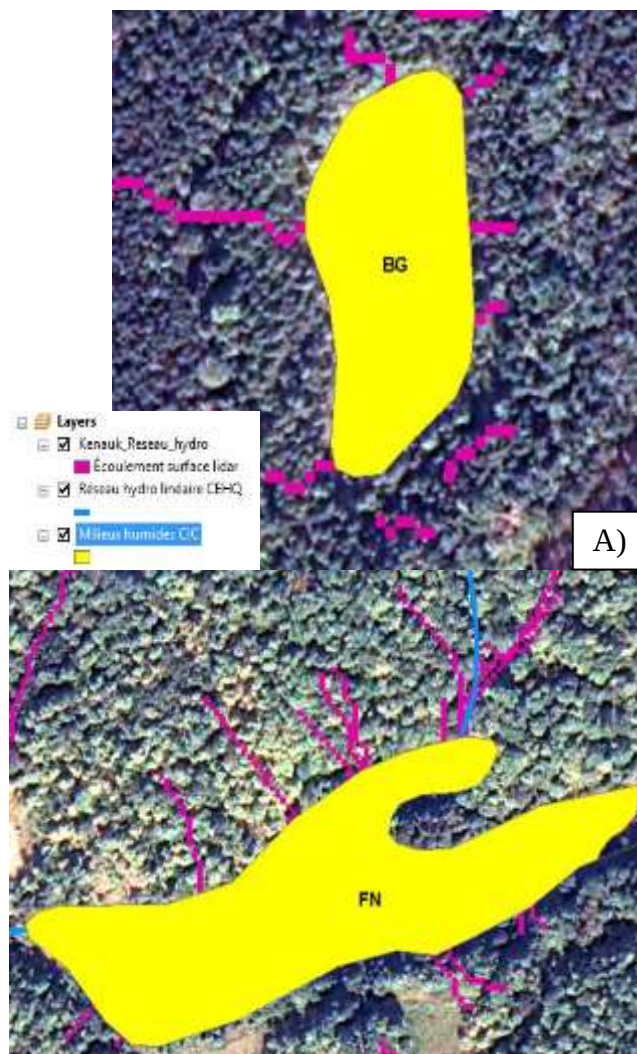


Figure 8. A) Écoulement de l'eau de surface pour une tourbière BOG. B) Écoulement de l'eau de surface pour une tourbière FEN

3.2.5. Indice d'humidité topographique TWI

Le TWI complète les produits dérivés automatisés développés dans le cadre de cette étude. Il a été utilisé pour confirmer les accumulations d'eau dans les dépressions et dans les milieux humides photo-interprétés comme un outil de dernière vérification après avoir terminé avec l'utilisation d'une grille 2x2 km. La figure 9 illustre le résultat du TWI avec des étangs vernaux identifiés de façon automatisée dans l'image A et de l'eau peu profonde photo-interprétée dans l'image B (contour jaune). Dans les deux images, le vert indique la présence de l'accumulation d'eau et les lignes bleues indiquent l'écoulement potentiel de l'eau.

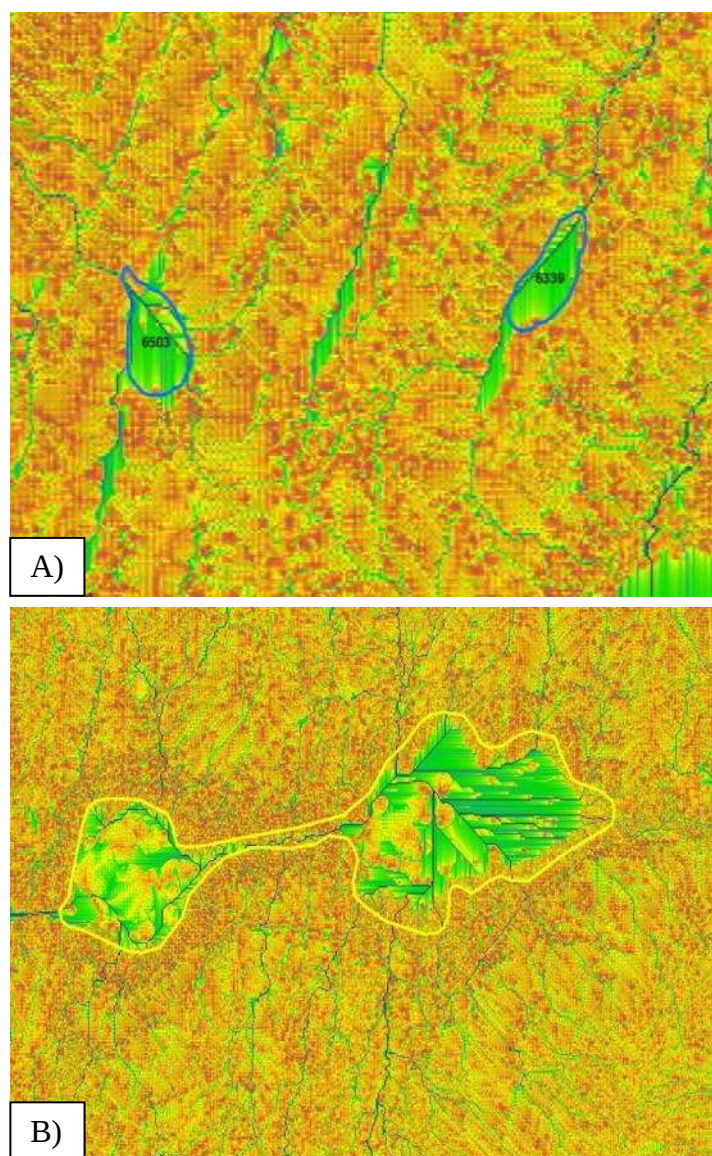


Figure 9. Indice d'humidité topographique TWI. A) Étangs vernaux. B) Eau peu profonde

3.3. IDENTIFICATION DES ÉTANGS VERNAUX POTENTIELS

Les analyses lidar ont permis d'obtenir un grand nombre de dépressions sur le territoire. Plusieurs critères itératifs ont été utilisés afin de réduire ce nombre et de parvenir à sélectionner des étangs vernaux potentiels. Chaque critère est très restrictif et le nombre d'étangs vernaux final permet d'être plus confiant sur ce résultat. Après avoir appliqué les huit critères cumulatifs, les résultats indiquent une présence de 362 étangs vernaux (tableau 4). Les résultats soulignent l'importance de l'utilisation de la cartographie détaillée des milieux humides dans le critère d'isolement (> 10m). Le cinquième critère est le deuxième plus important avec une coupure de 5 542 dépressions, passant de 6 499 à 957 étangs vernaux potentiels. Ce qui indique que la majorité des dépressions ne comportent pas d'eau visible au printemps. Les critères 6, 7 et 8 proviennent de la détection de changement entre les deux images satellitaires. L'absence d'eau en été et les critères NDVI moyen et NDWI max ont renforcé l'identification des étangs vernaux.

Tableau 4 : Statistiques des produits sélectionnés par critère pour le territoire complet

Critères cumulatifs	Territoire d'étude	
	Nombre	Superficie (ha)
# 1 - Superficie [50,1000] m ² . Julian <i>et al.</i> 2008	18 049	417,0
# 2 - Isolement (> 10 m). Reif <i>et al.</i> 2009	9693	204,2
# 3 - Profondeur (> 0,1 m). Lichvar <i>et al.</i> 2006	9199	199,8
# 4 - Drainage [50,5000] m ² . Varin <i>et al.</i> 2014	6499	138,3
# 5 - Présence d'eau printemps. Bertacchi <i>et al.</i> 2011	957	27,6
# 6 - Absence d'eau été. Bertacchi <i>et al.</i> 2011	765	21,8
# 7 - Différence NDVI moyen (ANOVA). Wu <i>et al.</i> 2014	452	13,1
# 8 - Différence NDWI max (ANOVA). Wu <i>et al.</i> 2014	362	10,0

La figure 10 illustre la distribution des 362 étangs vernaux sur le territoire d'étude. Elle indique également les petits milieux humides validés (bleus) et les étangs vernaux validés (magenta) lors de la campagne de terrain du printemps 2016.

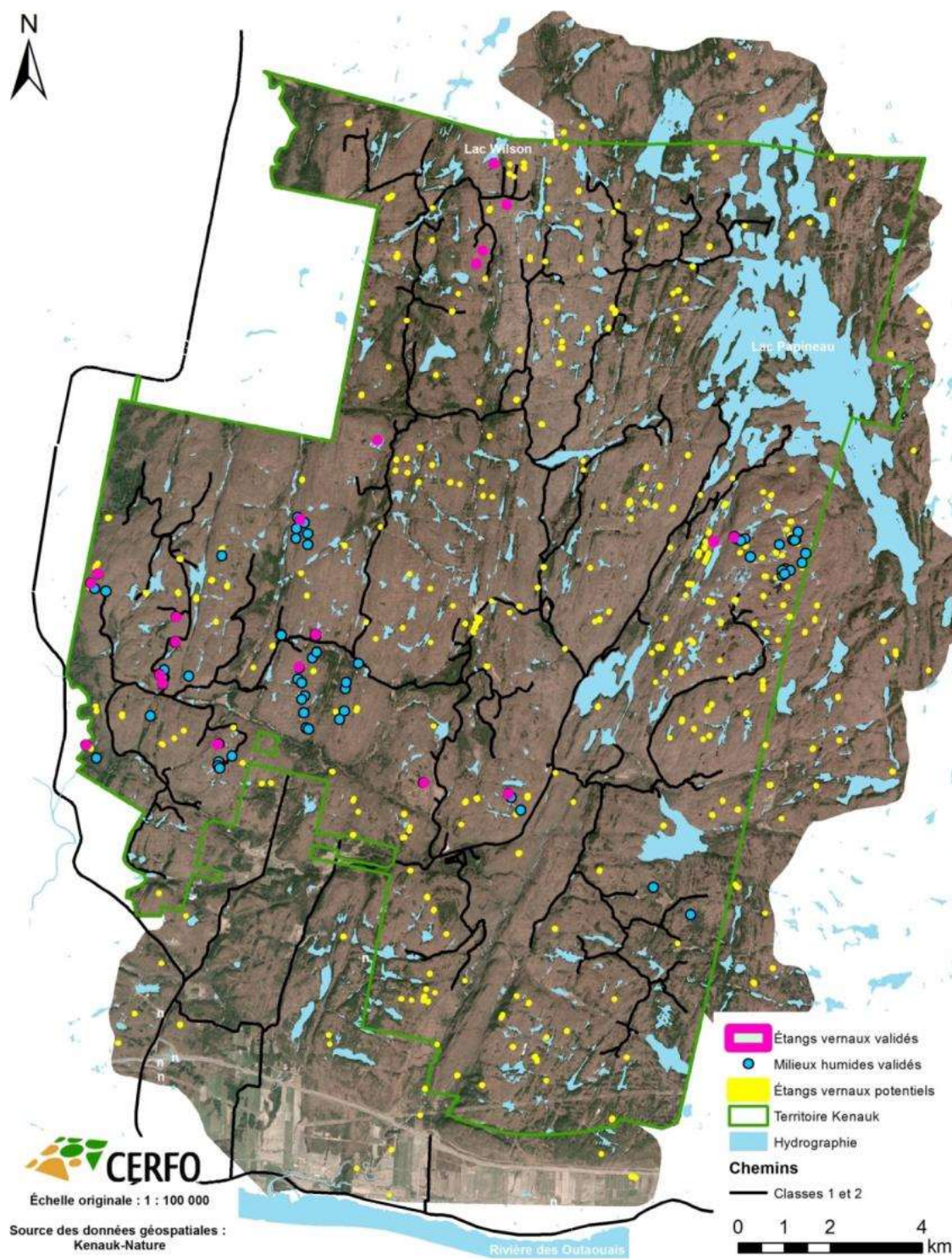


Figure 10 : Carte de la répartition des étangs vernaux potentiels

Réf. : 16-0751 / PB / 13/06/2017



3.4. CARACTÉRISTIQUES ÉTANGS VERNAUX POTENTIELS

Les caractéristiques physiques, les espèces d'arbres et le drainage des étangs vernaux validés sur le terrain sont décrits dans les sections suivantes.

3.4.1. Caractéristiques physiques

Le tableau 5 présente les caractéristiques physiques des étangs vernaux potentiels. Parmi les 362 étangs vernaux potentiels, 272 sont complètement isolés et 90 font partie de 40 complexes d'étangs vernaux. La présence d'un complexe est identifiée lorsqu'au minimum deux étangs vernaux ou plus sont distancés de moins de 30 mètres. La profondeur des dépressions varie entre 1,13 m et 1,19 m. L'aire de drainage des étangs vernaux en complexe est généralement 2 fois plus grande que celui des étangs vernaux isolés. La superficie moyenne des étangs vernaux isolés est de 293 m² alors que celle des étangs vernaux en complexe est de 520 m².

Tableau 5. Caractéristiques physiques des étangs vernaux

Étangs vernaux potentiels	Nombre	Profondeur (m)	IC	Drainage (m ²)	IC	Superficie moyenne (m ²)	IC
Isolés	272	1.19	0.07	1975	170	293	26
Complexes	90	1.13	0.14	3843	695	520	117

3.4.2. Espèce d'arbres

Les espèces d'arbres les plus fréquemment observés sont le bouleau jaune, l'érable rouge, l'orme d'Amérique, le frêne noir, l'érable à sucre et le hêtre à grandes feuilles (tableau 6). Les cinq premières ont la caractéristique commune d'être des espèces indicatrices de milieux au drainage imparfait souvent associés au marécage. Au total, 19 espèces d'arbres ont été observées dans les étangs vernaux.

Tableau 6. Espèces d'arbres observés dans les étangs vernaux

Espèces observées
Bouleau jaune
Bouleau à papier
Cerisier tardif
Chêne rouge
Épinette noire
Érable de Pennsylvanie
Érable rouge
Érable à sucre
Frêne d'Amérique
Frêne noir
Hêtre à grandes feuilles
Ormes d'Amérique
Ostryer de Virginie
Peuplier à grandes dents
Peuplier faux-tremble
Pin blanc
Pruche d'Amérique
Sapin baumier
Thuya occidental
Tilleul d'Amérique

3.4.3. Type de dépôt et drainage des étangs vernaux

Le tableau 7 présente le type de dépôt et de drainage des étangs vernaux. Les résultats indiquent que le drainage des étangs vernaux est à 93 % très mauvais (drainage 6) et que le type de dépôt est partagé entre l'organique et le sable et gravier. La présence de drainage très mauvais est très locale et est de pair avec la cuvette alors que le peuplement environnant présente souvent de bons drainages.

Tableau 7. Type de dépôt et drainage des étangs vernaux

Type de dépôt	Pourcentage (%)	Drainage	Pourcentage (%)
Limon	3%	Bon	3%
Organique	48%	Modéré	3%
Sable et gravier	48%	Très mauvais	93%

3.5. DÉTECTION DE CHANGEMENT ENTRE LES IMAGES SATELLITAIRES

La détection de changement entre les images de printemps et d'été a été effectuée à partir des différences NDVI moyen et NDWI max. Les ANOVAS effectuées ont permis le calibrage des seuils NDVI moyen et NDWI max de la borne inférieure et supérieure de l'intervalle de confiance selon les cas (seuil $\alpha = 5\%$). Ce calibrage a été effectué à partir des échantillons de terrain et a servi pour l'élaboration des critères cumulatifs 7 et 8 (tableau 4).

Les résultats indiquent une différence significative entre les étangs vernaux et les autres types de milieux humides pour le critère NDVI moyen (figure 12). Ces résultats soulignent l'importance de la différence d'activité photosynthétique de la canopée forestière au-dessus des étangs vernaux par rapport à celle des autres types de milieux humides beaucoup plus ouverts entre le printemps et l'été.

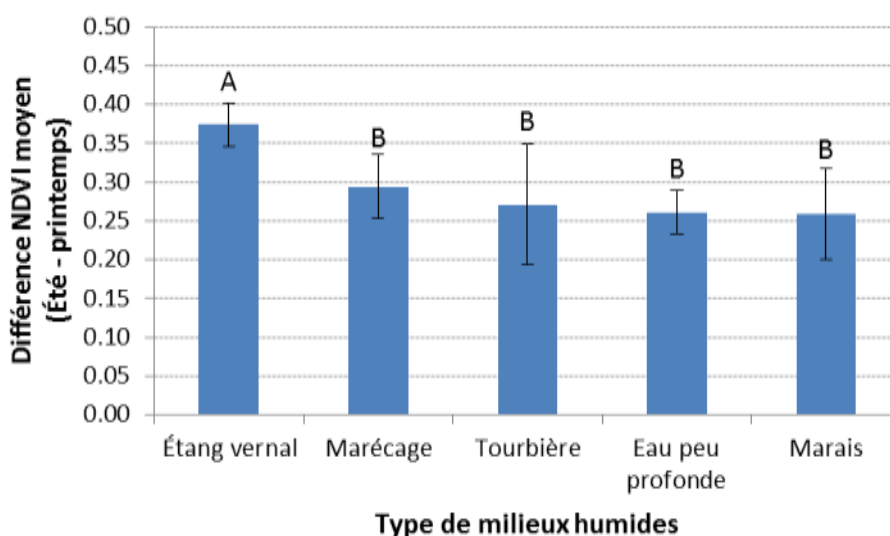


Figure 12. Différence NDVI moyen en fonction du type de petits milieux humides

Les résultats de l'analyse de variance effectuée avec le NDWI max confirment des différences significativement plus importantes d'humidités entre les étangs vernaux qu'envers les autres types de milieux humides (figure 13). Ce résultat est un indicateur du caractère plus humide dans les autres types de milieux humides alors les étangs vernaux s'assèchent en été. Par ailleurs, une matrice de corrélation entre ces deux critères a été élaborée et a démontré une corrélation de 77

%. Malgré la corrélation élevée, la complémentarité avec le critère NDVI moyen a fait passer les étangs vernaux potentiels de 452 à 362 et c'est pourquoi ce critère a été conservé.

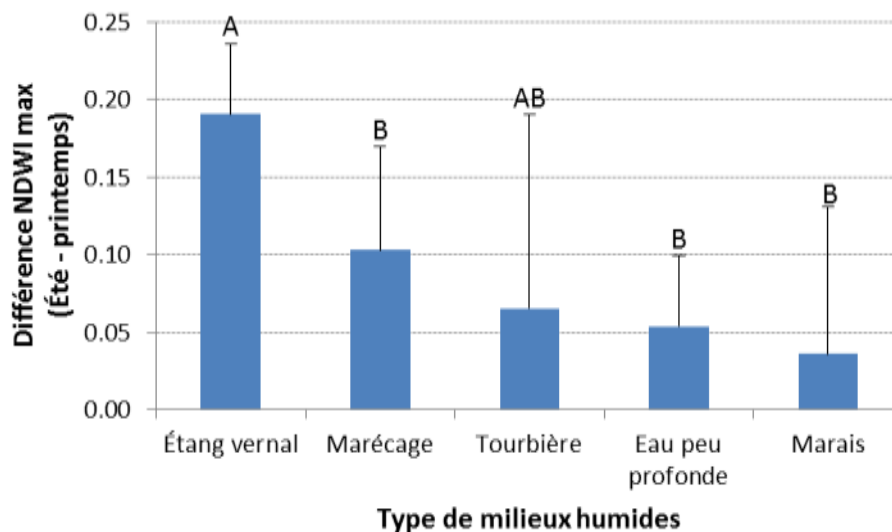


Figure 13. Différence NDWI max en fonction du type de petits milieux humides.

3.6. COMPARAISON ENTRE LA PHOTO-INTERPRÉTATION ET L'IDENTIFICATION AUTOMATISÉE DES DÉPRESSIONS

Le tableau 7 présente le nombre de milieux humides photo-interprétés contenant des dépressions identifiés avec le lidar. Avant d'effectuer les calculs, une analyse spatiale a été effectuée sur les milieux humides de la cartographie détaillée et des dépressions pour isoler les polygones qui n'étaient pas associés aux plans d'eau surfaciques de la BDTQ et du CRHQ. Une fois ces polygones isolés, le calcul de la présence de dépressions dans les milieux humides a été effectué pour documenter la fréquence à laquelle on retrouve des dépressions dans les milieux humides.

Les résultats indiquent que 48 % des polygones contiennent une dépression identifiée avec le lidar. Ce qui indique qu'il y a 52 % des polygones qui ne sont pas situés dans une dépression. Pour les milieux humides contenant des dépressions, les résultats indiquent que 75 % des polygones d'eau peu profonde contiennent une dépression. Les tourbières BOG, FEN et boisées ont entre 50 et 56 % de leur polygone avec une dépression. Les prairies humides et les marécages sont les milieux humides les moins bien représentés par des dépressions avec respectivement 40 et 41 %. La moins bonne performance à l'identification de ces deux classes de milieux humides était prévisible. La prairie humide est souvent identifiée sur un terrain plat et par défaut non

défini par une dépression alors que le marécage a souvent des exutoires qui ne permettent pas de refermer la cuvette pour qu'il soit considéré comme une dépression.

Tableau 8. Nombre de milieux humides photo-interprétés avec des dépressions par classe sur le territoire d'étude

Classe de milieux humides	Cartographie détaillée CIC		Proportion avec dépressions (%)
	Nombre total photo-interprété	Nombre avec dépressions	
Tourbière BOG	2	1	50%
Tourbière FEN	114	61	54%
Tourbière boisée	298	166	56%
Eau peu profonde	172	129	75%
Marécage	942	386	41%
Marais	70	33	47%
Prairie humide	81	32	40%
Total	1679	808	48%

3.7. STATISTIQUES SUR LES MILIEUX HUMIDES PAR CLASSE, TERRITOIRE KENAUKE

Le tableau 9 présente les statistiques d'occupation du sol par les milieux humides sur le territoire Kenauk. Les milieux humides 1 à 7 représentent les classes de la cartographie détaillée de Canards Illimités alors que les milieux humides de la classe 8 représentent les étangs vernaux et le résultat de la cartographie détaillée bonifiée. En terme de superficie, les résultats indiquent que les marécages, la tourbière minérotrophe et l'eau peu profonde sont les milieux humides les plus représentés. Les étangs vernaux représentent seulement 0,3 % de la superficie des milieux humides du territoire Kenauk, mais 10 % du total en nombre.

Tableau 9. Statistique d'occupation du sol par les milieux humides sur le territoire Kenauk

Milieux humides classifiés	Nombre de milieux humides (n)	Superficie des milieux humides (ha)	Proportion du territoire en milieux humides (%)	Taille moyenne des milieux humides (ha)	Répartition du nombre de milieux humides par classe (%)	Répartition de la superficie des milieux humides par classe (%)
1- Eau peu profonde	717	925	2.8	1.3	20.2	23.3
2- Marais	240	237	0.7	1.0	6.7	6.0
3- Marécage	1,303	1,193	3.6	0.9	36.6	30.1
4- Prairie humide	191	138	0.4	0.7	5.4	3.5
5- Tourbière boisée	348	523	1.6	1.5	9.8	13.2
6- Tourbière minérotrophe (fen)	391	938	2.8	2.4	11.0	23.6
7- Tourbière ombrotrophe (bog)	5	4	0.0	0.9	0.1	0.1
8- Étangs vernaux	362	10	0.03	0.03	10.2	0.3
Milieux humides (8 classes)	3,557	3,968	11.8	1.1	100.0	100.0

Sources des données :

1 - Cartographie détaillée des milieux humides des basses-terres de l'Outaouais (classe 1 à 7) - échelle territoire Kenauk, décembre 2016, équipe de réalisation : CIC et MDDELCC. 2 - Étangs vernaux identifiés par CERFO avec méthode images satellitaires et lidar semi-automatisée, janvier 2017. 3- Tableau préparé par CIC le 10 mars 2017

4. DISCUSSION

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

4.1. APPORTS DE LA MÉTHODE

L'avantage principal de l'utilisation du lidar dans la cartographie des milieux humides est sa capacité à pénétrer la canopée forestière, ce qui permet de voir les fins détails du sol. L'extraction du sol a permis de générer des couches de dépressions automatisées propices à la présence des milieux humides et de développer une méthode d'identification automatisée des étangs vernaux sur un grand territoire. La méthode développée a permis une avancée significative dans la détection des étangs vernaux en ajoutant des critères novateurs tels que la détection de changement de l'eau dans les dépressions entre les images de printemps et d'été et les différences NDVI moyen et NDWI max. L'ajout de ces critères a permis de réduire la confusion avec les autres classes de milieux humides.

D'autres avancés dans la détection des milieux humides, ont été réalisés avec ce projet. L'utilisation des images satellitaires à haute résolution spatiale de 50 cm au lieu de celle de 2 m utilisée dans Varin *et al.* (2016) a permis d'identifier davantage de dépressions contenant de l'eau. En effet, la méthode de classification par pixel utilisée a été plus sensible à la détection de l'eau que la méthode orientée-objet puisqu'un seul pixel était nécessaire pour indiquer la présence d'eau dans la dépression. L'utilisation combinée du lidar et des images satellitaires à haute résolution spatiale a permis de réduire significativement la taille minimale d'identification des milieux humides jusqu'à 50 m².

Souvent imperceptible lors de l'exercice de photo-interprétation, les étangs vernaux situés dans les érablières à tilleul et à bouleau jaune du territoire d'étude se distinguent des autres classes de milieux humides par une fermeture importante de la canopée forestière en été. Ce critère très important permet d'éviter l'évaporation causée par le soleil et donc de limiter l'assèchement de l'étang vernal. La canopée forestière semble donc jouer un rôle important d'écran protecteur pour les étangs vernaux. En appui à cette affirmation, nos équipes de terrain ont eu beaucoup plus de

difficultés à confirmer les étangs vernaux dans les coupes récentes que dans les peuplements matures.

Pour les grandes dépressions (> 0,1 ha), la méthode développée a principalement servi d'outil de pré-identification des milieux humides. Le lidar a été l'outil le plus utilisé par les photo-interprètes dans 8 % des cas alors que les outils traditionnels comme les photos aériennes 3D et la cartographie Sief du 4^e inventaire décennal représentaient la majorité des outils utilisés par les photos-interprètes. Le lidar était toujours affiché à l'écran des photos-interprètes qui s'en servaient pour aider la délimitation et la classification des milieux humides et pour confirmer les informations qui provenaient des autres outils. Le lidar a permis d'augmenter la précision cartographique et le niveau de confiance des photos-interprètes et d'ajouter une dizaine de milieux humides qui n'étaient pas visibles sur les photo-aériennes 3D du territoire Kenauk. Les statistiques d'occupation du sol par classe de hauteur, le TWI et l'écoulement de l'eau sont venus appuyer le travail des photo-interprètes en confirmant leurs observations.

Malgré le défi lié à l'utilisation de nouvelles technologies telle le lidar, celle-ci est mise 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 avec 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/absence d'eau par l'analyse d'images multispectrales temporelles. L'avantage principal de cette méthode est que les traitements du lidar permettent de bien délimiter les dépressions sans être influencés par la variable temporelle (Varin *et al.*, 2014).

4.2. LIMITES DE LA MÉTHODE

La principale limite de la méthode est qu'elle n'identifie pas les milieux humides hors dépressions. Pour pallier à cette lacune, une classification semi-dirigée des images satellitaires à

hautes résolutions spatiales des milieux humides aurait pu être utilisée comme première étape de préidentification. L'ajout de cette couche d'information aurait permis de générer le portrait des milieux humides avec dépressions et celui sans dépression. Toutefois cette méthode aurait nécessité beaucoup plus d'efforts de terrain, car il aurait fallu documenter la matrice de confusion des milieux humides des images satellitaires en plus d'évaluer la présence d'eau et l'identification des étangs vernaux par lidar.

Une étape supplémentaire de nettoyage est suggérer pour éliminer tout ce qui n'est pas un milieu humide dans l'étape de préidentification des dépressions avec le lidar. Cette étape permettrait d'obtenir une meilleure correspondance avec la cartographie détaillée des milieux humides et ainsi d'augmenter la précision.

La cartographie détaillée de Canards Illimités s'est avérée un intrant absolument nécessaire pour le critère d'isolement des étangs vernaux et toute autre initiative d'identification des étangs vernaux doit tenir compte de limites associées à la cartographie utilisée sans quoi il y aurait plusieurs petits milieux humides en complexes dans les grands milieux humides photo-interprétés. Le cas le plus souvent rencontré est celui du marécage qui présente souvent les mêmes caractéristiques que l'étang vernal.

La difficulté à identifier les étangs vernaux sur le terrain et à les dissocier des autres classes de milieux humides fait également partie des défis de la méthode, car les petits milieux humides peuvent être présents dans toutes les classes. En effet, les critères utilisés pour les identifier tels que la taille, la présence d'eau au printemps et l'absence d'eau en été, l'absence de connexion au réseau hydrique permanent et l'absence de poisson nécessitent parfois plusieurs visites pour les confirmer. La confusion avec d'autres types de milieux humides tels que la prairie humide et le petit marécage sont parfois inhérents. Pour pallier à cette lacune, il est suggéré d'utiliser une méthode de validation des milieux humides sur le terrain commune telle que celle développée au fil des années par Canards Illimités. La révision de certains critères d'identification comme la possibilité de soutenir de l'eau pendant une période d'au moins deux mois, période selon laquelle le cycle de reproduction des salamandres pourrait être complété, fait également partie des recommandations de cette étude.

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. Les étangs vernaux étant très dynamiques, il est possible que cette méthode sous-estime leur quantité. À l'inverse, on sait que le traitement lidar pour détecter les dépressions a souvent tendance à surestimer les milieux humides. C'est pourquoi plusieurs critères ont été appliqués afin d'être sévères dans la sélection d'étangs vernaux potentiels et d'être certain de leur identification.

D'autres études portent sur l'utilisation d'images multispectrales satellitaires seulement 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 petits milieux humides des autres milieux humides permanents. Enfin, les différences NVDI moyen et NDWI max ont été calibrés à partir des images Pléiades prises dans l'érablière à tilleul et à bouleau jaune. La calibration a été effectuée en fonction des étangs vernaux validés sur le terrain et l'extrapolation des seuils des intervalles de confiance à d'autres domaines bioclimatique doit être effectuée avec prudence.

Les données lidar ont aidé les travaux de photo-interprétation, mais il est possible d'effectuer la cartographie des milieux humides sans le lidar alors que l'inverse n'est pas le cas. Il n'est donc pas possible d'effectuer une cartographie exhaustive et précise de tous les milieux humides classifiés de plus de 0,3 ha sans photo-interprétation. Les résultats soulignent qu'il sera nécessaire d'utiliser d'autres algorithmes ou d'autres outils pour obtenir une meilleure précision.

4.3. PISTES D'AMÉLIORATION POSSIBLES

Une piste d'amélioration serait de faire un démixage spectral sur les images satellitaires 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 une meilleure estimation des étangs vernaux potentiels. Par exemple, la profondeur de la dépression ne correspond pas à la profondeur de l'eau, car celle-ci représente la limite maximale du niveau d'eau. Un autre critère pourrait aussi être ajouté pour restreindre les étangs vernaux 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.

Une étude plus approfondie des limites techniques de l'utilisation de l'image d'intensité du lidar pourrait servir à bonifier la méthode. L'exploration d'autres algorithmes utilisant le TWI n'est pas à négliger puisqu'ils pourraient bonifier le nombre de grandes dépressions en identifiant les dépressions avec exutoires. Ainsi, on pourrait obtenir une meilleure correspondance avec le travail des photo-interprètes. L'extrapolation et l'interprétation des valeurs du TWI sont donc perçues comme une piste à exploiter. Il faudra cependant calibrer les seuils avant de les exploiter. Comme les petits milieux humides (< 1 000 m²) renferment toutes les catégories de milieux humides, il est recommandé de poursuivre la campagne de terrain afin documenter la précision d'identification des étangs vernaux. Cela permettra de raffiner la description des étangs vernaux et de l'intégrer dans un système de classification déjà éprouvé.

4.4. RETOMBÉES

Le projet a permis une acquisition de données brutes lidar sur un territoire de 7 329 km², dont l'une à haute densité de points/m². L'ensemble des produits lidar développés dans ce projet ont été développés en fonction des besoins des partenaires et a été colligé sous la forme d'un document de formation ayant servi pour une formation sur mesure donnée aux équipes de géomatiques de Canards illimités et de la Société canadienne pour la conservation de la nature le 17 août 2016. Les participants ont pu s'approprier la méthode développée afin d'acquérir ces nouvelles connaissances et répéter l'expérience au besoin sur d'autres territoires. La formation a permis aux équipes de travail de se familiariser avec l'utilisation des données lidar et des produits dérivés.

Les milieux humides remplissent de nombreuses fonctions écologiques, peu importe leur taille. Ils constituent des habitats fauniques spécialisés, notamment pour la reproduction d'invertébrés, d'amphibiens, de reptiles, d'oiseaux et de sauvagines (Calhoun et Klemens, 2002; Lathrop et al., 2005; 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). La protection des habitats des espèces en situation précaire

constitue une obligation pour des normes de certification environnementales et il devient alors important de bien les caractériser pour assurer une protection adéquate permettant de conserver leurs fonctions écologiques (Wang et al., 2008). Évidemment, il n'est pas possible de les protéger s'ils ne sont pas identifiés préalablement.

Le projet a permis de valider une méthode novatrice d'identification d'étangs vernaux et le développement de produits dérivés pour bonifier les travaux de photo-interprétation pour les autres classes de milieux humides. Il a permis d'initier des mesures de protection des étangs vernaux et de cibler le potentiel d'aménagement de ces habitats essentiels pour la faune et la flore. La cartographie détaillée des milieux humides a permis de connaître la répartition, le nombre et la taille de ces habitats dans le territoire de l'Outaouais compris dans les basses-terres du Saint-Laurent. La cartographie des milieux humides pourra servir d'outil d'aide à la décision pour les intervenants dans un contexte de certification du territoire, de gestion intégrée des ressources et de développement durable. Le projet a permis d'améliorer les connaissances de la Société canadienne pour la conservation de la nature et de Canards Illimités Canada dans les domaines du lidar aéroporté et de l'imagerie multispectrale à haute résolution spatiale.

La méthode développée permet de fusionner deux technologies, habituellement utilisées indépendamment l'une de l'autre. En les mettant en relation, la puissance de la méthode est ainsi augmentée. Plus précisément, l'utilisation du lidar comme application topographique pour identifier les milieux humides représente un développement technologique très intéressant et innovateur. Cette approche a permis aux partenaires de se positionner comme chef de file au Canada et à l'international puisqu'actuellement la cartographie des milieux humides n'est pas effectuée ailleurs avec la technologie du lidar aéroporté.

CONCLUSION

Le projet a permis d'appliquer une approche semi-automatisée d'identification des étangs vernaux à partir du lidar aéroporté et des images satellitaires à haute résolution spatiale. Il a permis de développer une gamme de produits lidar dérivés utiles à la préidentification des milieux humides et d'obtenir une cartographie des milieux humides plus précise.

L'utilisation combinée du lidar et des images satellitaires à haute résolution spatiale de printemps et d'été a permis de réduire la taille minimale d'identification des étangs vernaux à 50 m², de raffiner les critères d'identification des étangs vernaux et de développer une nouvelle méthode complémentaire à celle de la photo-interprétation des images aériennes. La conception d'une méthode hybride de traitement à partir d'images satellitaires à haute résolution spatiale et du lidar constitue le caractère le plus innovant de ce projet. Ce projet a également permis une proximité entre la formation des étudiants et la recherche appliquée au Cégep de Sainte-Foy en permettant à des étudiants de travailler sur ce projet.

La méthode d'identification des petits milieux humides (< 0,1 ha) est complémentaire à celle de la cartographie détaillée de Canards Illimités. L'utilisation de cette méthode permettra de bonifier la cartographie détaillée de Canards Illimités et de créer une 8^e classe de milieux humides pour les étangs vernaux. Cette nouvelle couche d'information permettra aux chercheurs de les étudier davantage et de connaître la dynamique et le rôle que les étangs vernaux jouent dans l'écosystème. Elle permettra également de mettre en œuvre de nouvelles mesures de protection parfois nécessaires à la certification de certains territoires sous exploitation forestière. 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 et de protection des milieux humides.

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 – 24^e atelier sur la biodiversité. MRNF – Direction de l'expertise Faune-Forêts-Territoire du Bas-Saint-Laurent, 7 p.
- Brooks, Robert T. 2004. Weather-related effects on woodland vernal pool hydrology and hydroperiod wetlands. Vol. 24, No. 1, March 2004, pp. 104-114
- 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.
- Canards Illimités Canada (CIC) et le ministère du Développement durable, de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques (MDDELCC). 2017. Cartographie détaillée des milieux humides des basses-terres de la région administrative de l'Outaouais et ses environs - Rapport technique. 52 pages.
- Commonwealth of Massachusetts (2014). Energy and Environmental Affairs: Division of Fisheries and Wildlife. En ligne. http://www.mass.gov/dfwele/dfw/nhosp/species_info/nhfacts/eubbranchipus_intrincatus.pdf. Consulté le 14 mars 2014.
- Groupe de travail national sur les terres humides (GTNTH). 1997. Le système de classification des terres humides du Canada (SCTHC), 2e édition. Édité par B.G. Warner et C.D.A. Rubec. Recherche sur les terres humides, Université de Waterloo. Waterloo. Ontario. 68 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° 1, p. 89-106.
- Lathrop, R.G., Montesano, P., Tesauero, 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.
- 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.

Marchand Michael, 2016. Identifying and Documenting Vernal Pools in New Hampshire. New Hampshire Fish and Game Department. Nongame and Endangered Wildlife Program. Third edition. 87p.

Preisser, Evan L., J. Y. Kefer, J. D. Lawrence, T. W. Clark. 2000 Vernal Pool Conservation in Connecticut: An Assessment and Recommendations. Environmental Management Vol. 26, No. 5, pp. 503–513

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.

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.

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.

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.