Progrès dans l'application de la télédétection pour les besoins en matière d'information sur les forêts au Canada : leçons tirées d'une collaboration nationale d'intervenants universitaires, industriels et gouvernementaux

par Nicholas C. Coops^{1*}, Alexis Achim², Paul Arp³, Christopher W. Bator⁴, John P. Caspersen⁵, Jean-François Côté⁶, Jeffery P. Dech⁷, Adam R. Dick⁸, Karin van Ewijk⁹, Richard Fournier¹⁰, Tristan R. H. Goodbody¹, Chris R. Hennigar¹¹, Antoine Leboeuf¹², Olivier R. van Lier¹³, Joan E. Luther¹⁴, David A. MacLean³, Grant McCartney¹⁵, Gaetan Pelletier¹⁶, Jean-François Prieur¹⁰, Piotr Tompalski¹, Paul M. Treitz⁹, Joanne C. White¹⁷, Murray E. Woods¹⁸

RÉSUMÉ

Le secteur forestier canadien a besoin d'information détaillée au sujet de la quantité et des caractéristiques des ressources forestières. Pour répondre à de tels besoins, des systèmes d'inventaire exacts, complets et opportuns qui quantifient spatialement le bois d'œuvre et les autres services écosystémiques liés aux forêts sont nécessaires. Le projet quinquennal AWARE (Assessment of Wood Attributes using Remote sEnsing [évaluation des attributs du bois à l'aide de la télédétection]) était une collaboration entre sept universités canadiennes et sept entreprises forestières soutenue par des organismes forestiers provinciaux et fédéraux et d'autres organismes sans but lucratif axés sur la foresterie. AWARE a fourni des méthodes et des outils pour améliorer la caractérisation des forêts à une échelle nationale, du paysage et de l'arbre individuel. Vingt-quatre boursiers de recherches postdoctorales et étudiants au doctorat et à la maîtrise se sont associés au projet et ont examiné les rôles que les technologies de télédétection tridimensionnelle (3D) de pointe peuvent jouer dans la conception de systèmes d'inventaire forestier précis partout au Canada. Dans le présent article de revue, nous nous penchons sur le projet de recherche AWARE, les points saillants de la recherche, les résultats clés et les besoins futurs en recherche et présentons une évaluation des réussites et des défis auxquels le projet a été confronté au cours de ses cinq ans.

Mots-clés : inventaire forestier, balayage laser aéroporté, BLA, terrestre, télédétection

ABSTRACT

The Canadian forest sector requires detailed information regarding the amount and characteristics of the forest resource. To address these needs, inventory systems that spatially quantify timber and other forest related ecosystem services are required, that are accurate, comprehensive and timely. The Assessment of Wood properties using Remote Sensing (AWARE) was a five-year project involving collaboration between seven Canadian universities, and seven forest companies with support provided by provincial and federal forestry agencies and other non-for-profit forestry focused organisations. AWARE provided methods and tools to enhance the characterization of forests at national, landscape and individual tree scales. The project supported 24 post-doctoral fellows, PhD and MSc students that examined the roles that advanced three-dimensional remote sensing technologies can play in the development of accurate forest inventory systems across Canada. In this review we examine the AWARE research project, review research highlights, key outcomes, future research needs, and provide an assessment of successes and challenges the project faced over its five-year lifetime.

Keywords: forest inventory, airborne laser scanning, ALS, terrestrial, remote sensing

¹Integrated Remote Sensing Studio, Department of Forest Resources Management, University of British Columbia, 2424 Main Mall, Vancouver, BC, V6T 1Z4, Canada. * Auteur-ressource. Nicholas.coops@ubc.ca

²Centre de recherche sur les matériaux renouvelables, Département des sciences du bois et de la forêt, Université Laval, 2425 rue de la Terrasse, Québec, QC, G1V 0A6, Canada.

³Forest Stewardship and Trade Branch, Forestry Division, Alberta Agriculture and Forestry, Suite 303, 7000 - 113 Street, Edmonton, AB, T6H 5T6, Canada.

⁴Forest Stewardship and Trade Branch, Forestry Division, Alberta Agriculture and Forestry, 10800 97 Ave NW, Edmonton, AB, T5K 2M4, Canada.

⁵Institute of Forestry and Conservation, Graduate Department of Forestry, John H. Daniels Faculty of Architecture, Landscape and Design, University of Toronto, 1 Spadina Crescent, Toronto, ON, M5S 2J5, Canada.

⁶Natural Resources Canada, Canadian Forest Service – Canadian Wood Fibre Centre, 1055 rue du P.E.P.S., Québec, QC, G1V 4C7, Canada.

⁷Department of Biology and Chemistry, Nipissing University, 100 College Drive, North Bay, ON, P1B 8L7, Canada.

⁸Natural Resources Canada, Canadian Forest Service, Canadian Wood Fibre Centre, 1350 Regent Street, Fredericton, New Brunswick, E3B 5P7, Canada.

⁹Department of Geography and Planning, Queen's University, 68 University Avenue, Kingston, ON, K7L 3N6, Canada.

¹⁰Département de géomatique appliquée, Centre d'Applications et de Recherches en Télédétection (CARTEL), Université de Sherbrooke, 2500 Boulevard de l'Université, Sherbrooke, QC, J1K2R1 Canada.

¹¹New Brunswick Dept. of Nat. Res., Hugh John Flemming Forestry Centre, P. O. Box 6000, Fredericton, NB, E3B 5H1, Canada.

¹²Ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs, 5700, 4^{ème} Avenue Ouest, Québec, QC, G1H 6R1, Canada,

¹³Natural Resources Canada, Canadian Forest Service, Canadian Wood Fibre Centre, 26 University Drive, Corner Brook, NL, A2H 5G4, Canada.

¹⁴Natural Resources Canada, Canadian Forest Service, Atlantic Forestry Centre, 26 University Drive, Corner Brook, NL, A2H 5G4, Canada.

¹⁵Chief Forester's Group – Ontario, RYAM Forest Management, Rayonier Advanced Materials, Unit 203 - 37 Preston Street, Timmins, ON, P4N 3M7, Canada.

¹⁶Northern Hardwoods Research Institute, 165 Boulevard Hébert, Edmundston, NB, E3V 2S8, Canada.

¹⁷Natural Resources Canada, Canadian Forest Service, Pacific Forestry Centre, 506 West Burnside Road, Victoria, BC, V8Z 1M5, Canada.

¹⁸Retired - Natural Resources Information Section, Science and Research Branch, Ontario Ministry of Natural Resources and Forestry, North Bay, Ontario P1A 4L7, Canada.

Introduction

L'industrie forestière canadienne doit s'adapter aux contraintes qui évoluent rapidement dans le secteur forestier pour satisfaire un ensemble de règles, de normes, de pratiques commerciales et d'attentes du public de plus en plus complexes (c.-à-d. objectifs économiques, environnementaux et de politique sociale). Ainsi, le secteur forestier doit tirer le maximum de valeur de chacun des arbres récoltés tout en appliquant un aménagement forestier durable. La connaissance des attributs du peuplement, de la station et de l'arbre revêt la plus haute importance pour les aménagistes forestiers et peut influencer les décisions de toute la chaîne de valeur de la forêt (Fridman *et coll.* 2014). La combinaison d'essences, l'âge du peuplement et l'indice de qualité de station sont utilisés pour estimer ou prédire la qualité et la quantité potentielles de bois d'œuvre disponible pour répondre aux diverses demandes du marché. La valeur économique du bois récolté est fonction de son utilisation finale et est grandement influencée par de multiples facteurs, y compris la combinaison d'essences, la qualité de la fibre ligneuse et les dimensions des tiges. De l'information exacte, uniforme et fiable sur la qualité de la ressource forestière à l'échelle du paysage, du peuplement et de l'arbre individuel avant la récolte représente un énorme avantage pour le secteur forestier en permettant l'optimisation des stratégies de récolte et de marketing (Briggs 2010; White *et coll.* 2016). Au Canada, les gouvernements provinciaux et territoriaux ont mis en œuvre des programmes d'inventaire forestier en fonction de leurs propres normes et besoins en information (Leckie et Gillis 1995 ; Magnussen *et coll.* 2017). Ces inventaires forestiers visent principalement la planification de l'unité d'aménagement (Gillis 2001) et répondent à de multiples objectifs de gestion des ressources ; toutefois, la résolution spatiale et les attributs des polygones interprétés à partir de photographies conventionnelles sont souvent insuffisants pour appuyer la planification, la gestion et les décisions d'investissement qui sont nécessaires pour améliorer la compétitivité du secteur forestier du Canada (White *et coll.* 2016).

Le manque d'information forestière exacte et précise constitue un important obstacle à la gestion adaptative et efficace des forêts et entrave l'offre en temps opportun de services écosystémiques. Il existe deux besoins cruciaux pour lever cet obstacle : d'abord, concevoir des systèmes d'inventaire précis qui quantifient spatialement le bois d'œuvre et les autres services écosystémiques liés à la forêt ; ensuite, favori-

ser l'utilisation de ces systèmes pour améliorer la modélisation des écosystèmes forestiers, tant pour ce qui est de l'exactitude que de l'exhaustivité. Mesurant l'importance grandissante de systèmes d'inventaire exacts, opportuns et complets pour l'aménagement forestier partout au Canada, le Centre canadien sur la fibre de bois (CCFB) et FPInnovations, en collaboration avec le Conseil de recherches en sciences naturelles et en génie du Canada (CRSNG), ont sollicité des propositions appliquées pour améliorer l'exactitude et la précision des inventaires forestiers tout en réduisant les coûts et en augmentant la rapidité de l'acquisition de données. De ce fait, un projet quinquennal d'envergure (Assessment of Wood Attributes using Remote Sensing, AWARE) a été mis sur pied avec la collaboration de sept universités canadiennes et sept entreprises forestières avec l'appui d'organismes forestiers provinciaux et fédéraux et d'autres organismes sans but lucratif axés sur la foresterie. La proposition s'est associée à 24 boursiers de recherches postdoctorales et étudiants au doctorat et à la maîtrise et a axé la recherche sur un certain nombre de sites principaux partout au Canada représentant un éventail de types forestiers, comprenait des zones d'aménagement forestier actif et a obtenu des ensembles de données à l'appui d'une diversité de questions de recherche.

Dans le présent examen, nous documentons les points saillants de la recherche du projet AWARE et nous penchons sur les leçons tirées de l'application de la télédétection pour les besoins en matière d'information sur les forêts au Canada. Nous effectuons une rétrospective du programme de recherche AWARE étant donné son achèvement en mars 2020 et réexaminons la conception du projet, les questions de recherche posées, les résultats de recherche et les livrables obtenus. Nous présentons ensuite une évaluation des réussites et des défis à l'égard du programme de recherche en général et des collaborations entre l'industrie, le gouvernement et les universités. Nous précisons en outre les leçons tirées et formulons des recommandations pour les grands projets concertés à venir visant essentiellement à répondre aux besoins de l'industrie forestière canadienne.

Conception du projet AWARE

Aperçu

Le projet AWARE a été imaginé au début des années 2010 lorsque la capacité des technologies de télédétection avait considérablement progressé pour mesurer et prédire un ensemble de caractéristiques du peuplement, de la station, de

<p>Thème 1 - National</p>	<p>Thème 2 - Paysage</p>	<p>Thème 3 - Arbre individuel</p>	<p>Thème 4 - Transversal</p>
<ul style="list-style-type: none"> - Facteurs écologiques et implications pour l'aménagement forestier - Variabilité structurelle et propriétés du bois - Approches d'échantillonnage pour suivi au niveau régional <p>3 projets 3 publications</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Amélioration des modèles de croissance des peuplements - Nouvelles mesures de structure pour la description des peuplements forestiers - Cartographie hydrologique et productivité - Modèles de prédiction pour la classification écologique des stations forestières, l'habitat forestier et la santé des forêts <p>15 projets 24 publications</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Évaluation de la croissance en utilisant des séries temporelles de données de balayage laser terrestre - Extraction d'attributs et de mesures d'arbres - Données lidar acquises depuis des véhicules aériens sans pilote et des appareils mobiles <p>2 projets 2 publications</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Évaluation d'espèces - Nouvelles approches de délimitation d'arbres - Nouveaux outils de traitement de nuages de points - Pratiques exemplaires, outils et supports de décision - Programmes et plateformes d'acquisition de données <p>5 projets 4 publications</p>

Fig. 1. Les quatre thèmes explorés au cours du projet AWARE. Remarque: délimitation individuelle des arbres (ITD); balayage laser terrestre (TLS); véhicule aérien sans pilote (UAV).

l'arbre et du bois à différentes échelles spatiales (Wulder *et coll.* 2013). Le projet AWARE a été conçu pour mettre l'accent sur la technologie de détection et télémétrie par ondes lumineuses (LiDAR : *Light Detection and Ranging*), mais d'autres technologies de télédétection comme la photogrammétrie aérienne numérique (PAN) et les données optiques aériennes et de satellite ont également été utilisées dans certaines études. La technologie LiDAR des instruments de balayage laser terrestre et aéroporté (c.-à-d. BLT et BLA respectivement) en particulier permet l'acquisition de données à l'échelle de l'arbre individuel et du peuplement extrêmement détaillées (Vastaranta *et coll.* 2012).

Le projet AWARE a été défini comme une série de thèmes (Fig. 1), étant entendu que bien des intervenants du projet avaient divers besoins en matière d'information variant dans les échelles spatiales. À l'échelle spatiale la plus large, les organismes fédéraux et provinciaux sont chargés de rendre compte des tendances nationales et provinciales en matière de croissance, d'état et de qualité des forêts. En revanche, à une échelle du peuplement, les résultats de recherche présentent un intérêt pour les inventaires tactiques et d'exploitation et la gestion, y compris les activités comme la modélisation de la croissance et du rendement et la sylviculture. Enfin, à l'échelle de l'arbre individuel, les attributs de l'arbre peuvent être utilisés pour informer sur la qualité des tiges et fournir de précieux renseignements, comme l'allométrie, qui peuvent ensuite entrer dans les estimations de la biomasse et de la structure du peuplement au niveau de la parcelle et à l'échelle nationale. En plus de ces trois thèmes de recherche, un thème trans-sectoriel portait essentiellement sur l'élaboration de normes et de mécanismes de mise en œuvre (c.-à-d. acquisition de données, standards de qualité) pour de tels ensembles

de données de télédétection avancée et les produits d'information en découlant ainsi que la production d'ensembles de données de démonstration et d'études de cas. Des sites de recherche principaux ont été établis à Terre-Neuve-et-Labrador, au Nouveau-Brunswick, en Ontario et en Alberta rendant compte de divers types forestiers et productivités partout au Canada (Tableau 1).

Questions de recherche à l'échelle nationale

À l'échelle nationale, les projets de recherche étaient axés sur l'incidence relative des facteurs écologiques comme les perturbations, la productivité et l'aménagement sur les variations de grande portée dans la structure du peuplement. Notamment, des projets examinaient la capacité de la technologie LiDAR à approfondir la compréhension de l'incidence possible des facteurs écologiques sur la structure du peuplement, y compris les changements climatiques, p. ex. la stabilité de la limite septentrionale des arbres ou l'effet des perturbations, principalement le feu, sur de multiples structures du peuplement dans des chronoséquences.

Questions de recherche à l'échelle du paysage

À l'échelle de l'aménagement du paysage, les questions s'intéressaient à la façon dont la technologie LiDAR et les autres ensembles de données de télédétection peuvent être appliqués pour améliorer les programmes d'inventaire. Ces questions étaient regroupées en quatre sous-thèmes. Le premier sous-thème visait à acquérir une meilleure compréhension de la façon dont la relation entre les principaux paramètres de nuage de points LiDAR change avec les mesures sur le terrain de la structure, appliquée à différents milieux forestiers. Une comparaison des paramètres de nuage de points LiDAR a été

Tableau 1. Sites de recherche principaux établis pour le projet AWARE de l'est à l'ouest du Canada

Lieu	Superficie	Type forestier	Partenaire industriel	Principales données de télédétection 3D utilisées dans AWARE	Données de terrain
Bassin hydrographique de la rivière Harry (T.-N.-L.)	95 000 ha	Espèces résineuses boréales	Corner Brook Pulp and Paper Limited	BLA (2016, 7,3 points/m ²) BLT (2009–2010, 227 arbres sur 68 placettes)	Placettes d'inventaire du SCF et d'AWARE
District de Black Brook (N.-B.)	200 000 ha	Forêt mixte acadienne	JD Irving Limited	BLA (2011, 2013 6 points/m ²)	Placettes d'inventaire de JD Irving Limited et cartes des arbres individuels d'AWARE
Zone d'aménagement de la forêt Hearst (Ont.)	1 250 000 ha	Forêt boréale	Ryam Forest Management/ Lecours Lumber/ Columbia Forest Products	BLA (2007, 0,82 points/m ²)	Placettes d'inventaire de Ryam Forest Management, de la province et d'AWARE
Gordon Cosens (Ont.)	1 880 369 ha	Forêt boréale	Ryam Forest Management	PAN (2016, 4,3 points/m ²)	Placettes d'inventaire de Ryam Forest Management, de la province et d'AWARE
Forêt expérimentale de Petawawa (Ont.)	10 000 ha	Forêt mixte	SCF	BLA multispectral (2016; 4,1 – 10,0 points/m ² selon la bande spectrale)	Placettes d'inventaire à long terme du SCF et placettes d'inventaire d'AWARE
Forêt de Slave Lake (Alb.)	700 000 ha	Forêt mixte boréale	West Fraser	BLA (2006–2008, 1,63 points/m ²) PAN (2015, 0,82 points/m ²)	Placettes d'inventaire de West Fraser, de la province et d'AWARE

Remarque : balayage laser aéroporté (BLA), photogrammétrie aérienne numérique (PAN), Service canadien des forêts (SCF)

effectuée entre les sites, mais également sur la variation d'un site à un autre des modèles transférables qui associent les nuages de points aux attributs forestiers (p. ex. volume), au moyen d'une approche par zones (APZ). Le deuxième sous-thème était axé sur l'estimation de la croissance des forêts et l'utilisation de la technologie LiDAR et d'autres technologies de télédétection 3D pour évaluer la croissance au fil du temps. De nombreuses études appliquant diverses méthodologies ont été menées, notamment en comparant les estimations de hauteur et de volume à deux pas de temps et calculant la différence, en incorporant les observations de la technologie LiDAR aux modèles de croissance existants, ainsi que des approches d'imputation qui permettent la redistribution des données à l'échelle de la parcelle dans le paysage et leur association à des modèles de croissance d'arbres individuels. Le troisième sous-thème visait à améliorer notre compréhension des propriétés du sol associées à la croissance des peuplements et des arbres en mettant à profit les modèles numériques de terrain (MNT) à très petite échelle obtenus avec la technologie LiDAR et en prédisant un éventail de propriétés du sol pouvant influencer la croissance et la gestion des plantations. Enfin, une série de questions étaient axées sur l'estimation d'une gamme de biens et services écologiques forestiers pouvant être obtenus d'ensembles de données LiDAR et d'autres technologies de télédétection, y compris l'habitat, la santé des forêts et la classification de stations.

Questions de recherche à l'échelle de l'arbre individuel

À l'échelle de l'arbre individuel, les projets mettaient l'accent sur l'extraction des attributs de l'arbre individuel des observations de la technologie LiDAR à très petite échelle obtenues de plateformes au sol ou d'un véhicule aérien télé-guidés (UAV). Ces projets visaient à relier les attributs de l'arbre individuel établis par la technologie LiDAR, comme la ramification, le diamètre et le défilement, et établir comment ces attributs peuvent orienter les estimations de la structure à l'échelle de la parcelle et du peuplement. Les données LiDAR ont été acquises à une plage de densités en un point de multiples capteurs et plateformes. Nous avons donc été en mesure d'examiner plusieurs approches de traitement des données pour évaluer l'incidence des paramètres d'acquisition de données sur les mesures tirées et les variables modélisées.

Questions de recherche trans-sectorielles

Le dernier thème portait essentiellement sur des questions communes à un grand nombre d'entreprises d'aménagement forestier et de gouvernements au Canada et à l'ensemble des échelles spatiales relativement à l'utilisation efficace des technologies de télédétection. Celles-ci comprenaient la mise au point de nouvelles routines pour extraire les couronnes d'arbres individuels de nuages de points LiDAR haute densité obtenus par aéronef ainsi que des prédictions d'essences indi-

viduelles sur les couronnes extraites de manière optimisée et rentable. Le présent thème s'est en outre traduit par le développement d'une trousse à outils en R, dont l'usage est maintenant très répandu, pour le traitement des données LiDAR afin d'aider les utilisateurs d'ensembles de données LiDAR et d'autres technologies de télédétection 3D à traiter efficacement les données LiDAR.

Points saillants de la recherche AWARE

Au cours de la période quinquennale, le projet AWARE a produit d'importants résultats utiles à l'égard des études et de la formation de cycle supérieur, du transfert de technologies des universités à l'industrie et au gouvernement et de la publication de recherche de calibre mondial dans des revues spécialisées de renom et a produit des résultats utiles pour les entreprises d'aménagement forestier. Nous présentons une courte synthèse de certains résultats de recherche ci-dessous, à la fois pour souligner les progrès et pour suggérer là où les futures initiatives de recherche fondées sur la technologie LiDAR au Canada pourraient continuer de contribuer aux solutions d'entreprise au pays. Au moment de la préparation de cette publication, une variété d'activités de transfert de connaissance, des progiciels (Tableau 2) et un total de 40 articles scientifiques décrivant la recherche de AWARE ont été publiés (Tableau 3), un petit nombre étant toujours en préparation. Bien que la totalité de la recherche découlant d'AWARE puisse être consultée dans des publications ou des thèses d'étudiants, nous présentons ici quatre points saillants qui illustrent comment celle-ci a contribué directement à améliorer l'inventaire forestier et d'autres aspects de la foresterie durable. Les quatre points saillants décrits ci-dessous

résumant la recherche sur : (1) l'utilisation d'ensembles de données de nuages de points pour améliorer la modélisation de la croissance des forêts; (2) l'analyse à l'échelle de l'arbre individuel et la classification des espèces; (3) l'extraction de renseignements détaillés sur les arbres individuels et les placettes avec le BLT ; et, finalement (4) l'utilisation des données de télédétection 3D au-delà des méthodes classiques d'inventaire forestier pour prédire des attributs forestiers supplémentaires avec une orientation plus écologique.

Utilisation des données de télédétection 3D pour prédire la croissance des forêts

L'approche AWARE

La possibilité d'accès accrue aux nuages de points 3D, y compris au BLA et à la PAN, permet la dérivation d'information d'inventaire forestier comportant un niveau élevé de précision des attributs et de détails spatiaux. L'acquisition multitemporelle d'ensembles de données de nuages de points dans une même zone est de plus en plus commune, ce qui facilite l'analyse détaillée des changements dans la structure forestière au fil du temps (McRoberts *et coll.* 2014). Lorsqu'elles sont utilisées dans un inventaire forestier amélioré (IFA), les estimations fournies par le BLA ou la PAN ont des avantages sur les ensembles de données d'inventaire polygonal interprétés à partir de photographies conventionnelles. Cependant, il est important de tenir compte des limites de la modélisation de la croissance des forêts, à savoir en général l'impossibilité de prédire avec exactitude l'âge du peuplement ou la composition des essences, éléments tous deux essentiels des modèles de croissance et de rendement des forêts (Tom-palski *et coll.* 2016; White *et coll.* 2016). Dans le cadre du pro-

Tableau 2. Ressources et échange des connaissances du projet AWARE

Quoi		Où
Données		
Super site de la Forêt expérimentale de Petawawa (mis en place par le CCFB)	Archive des données de balayage laser mobile (BLM) et de placettes acquises à la FEP	https://opendata.nfis.org/mapserver/PRF.html White <i>et coll.</i> (2019)
Échange des connaissances		
Série de conférences en ligne de l'Institut forestier du Canada (IFC)	Cinq conférences en ligne sur les résultats de recherche du projet AWARE	https://www.cif-ifc.org/events/cif-ifc-e-lectures-the-aware-project-results-and-outcomes/
Code/trousses		
lidR	Trousse écrite pour l'environnement de programmation R pour le traitement des données LiDAR	CRAN.R-project.org/package=lidR
Foster (extrapolation de la structure forestière avec R)	Trousse écrite pour l'environnement de programmation R pour l'extrapolation des données LiDAR à des zones plus vastes à l'aide de l'interpolation	github.com/mqueinnec/foster
SEGMA	Algorithme de délimitation d'arbres individuels	Veuillez communiquer avec les auteurs

Tableau 3. Liste d'articles évalués par les pairs publiés ou sous presse traitant de la recherche AWARE, y compris les auteurs, le thème AWARE, les ensembles de données utilisés, le site principal et un résumé

Publication	AWARE Thème	Type de données utilisées	Station AWARE	Résumé de la publication
Bolton <i>et coll.</i> 2018	1	BLA, Landsat	À l'échelle du Canada	Données de BLA et données chronologiques Landsat utilisées pour caractériser les écotones au-dessus de la limite forestière et les changements des écosystèmes
Bolton <i>et coll.</i> 2020	1	BLA, Landsat	Bassin hydrographique de la rivière Harry, Hearst, Forêt expérimentale de Petawawa, Slave Lake (Alb.)	Estimation des attributs forestiers dans diverses conditions à partir des données de BLA et données chronologiques Landsat combinées
Budei et St-Onge 2018	4	BLA multispectral	Forêt régionale de York (Ont.)	Démonstration de l'influence de la hauteur sur les métriques de BLA 3D et d'intensité
Budei <i>et coll.</i> 2018	4	BLA multispectral	Scarborough (Ont.), forêt régionale de York (Ont.)	Évaluation de l'exactitude du BLA multispectral à retours discrets pour identifier les essences
Coops <i>et coll.</i> 2020	1	BLA, Landsat	À l'échelle du Canada	Examen global des approches pour étendre les observations par BLA/satellite à de vastes zones
Côté <i>et coll.</i> 2018	3	BLT, BLA, L-Architect	Dans l'ensemble de Terre-Neuve-et-Labrador	Démonstration de la capacité d'améliorer la caractérisation des attributs d'inventaire forestier à l'aide de données de BLT et BLA
Côté <i>et coll.</i> 2020	3	BLT	Bassin hydrographique de la rivière Harry	Examen des attributs structuraux des arbres et des peuplements les plus utiles pour prédire les attributs de la fibre de bois à l'échelle de l'arbre
Crespo-Peremarch <i>et coll.</i> 2020	3	BLA (retours discrets et formes d'ondes complètes), BLT	Bassin hydrographique de la rivière Harry	Examen de la capacité du BLA à formes d'ondes complètes à définir le sous-étage de la végétation
Donovan <i>et coll.</i> 2018	2	Images hémisphériques	Péninsule de Gaspé (Québec)	Utilisation et comparaison des images hémisphériques avant et après pour quantifier les changements dans le feuillage des couronnes en raison de la défoliation causée par la tordeuse des bourgeons de l'épinette
Donovan <i>et coll.</i> 2021	2	Imagerie hyperspectrale satellitaire	Péninsule de Gaspé (Québec)	Évaluation de la valeur prédictive de l'imagerie hyperspectrale satellitaire pour prédire les classes de défoliation causée par la tordeuse des bourgeons de l'épinette
Frizzle <i>et coll.</i> 2021	2	BLA	Bassin hydrographique de la rivière Harry	Examen de la capacité du MAN reposant sur les données de BLA à fournir de l'information sur la qualité de l'eau et le ruissellement
Furze <i>et coll.</i> 2017a	2	MNT reposant sur les données de BLA	District de Black Brook	Modélisation et cartographie de la productivité de plantations d'épinettes noires et blanches à l'aide d'attributs forestiers et de MNT
Furze <i>et coll.</i> , 2017b	2	BLA, modèle altimétrique numérique (MAN)	District de Black Brook	Comparaison de différentes sources de données de MAN pour détecter des chenaux d'écoulement et zones humides non cartographiés
Goodbody <i>et coll.</i> 2018a	2	PAN	Forêt Gordon Cosens	Évaluation de la capacité des données de PAN à haute résolution spatiale à prédire la défoliation cumulative dans les peuplements hôtes de la tordeuse des bourgeons de l'épinette

Tableau 3. Liste d'articles évalués par les pairs publiés ou sous presse traitant de la recherche AWARE, y compris les auteurs, le thème AWARE, les ensembles de données utilisés, le site principal et un résumé (suite)

Publication	AWARE Thème	Type de données utilisées	Station AWARE	Résumé de la publication
Goodbody <i>et coll.</i> 2018b	2	Imagerie de système d'aéronef sans pilote (UAS)	Edmundston	Examen de l'influence du moment de l'acquisition en vol sur l'exactitude et la couverture des MNT dans les zones de faible couverture forestière
Goodbody <i>et coll.</i> 2019	2	PAN	À l'échelle du Canada	Examen de la PAN comme outil pour mettre à jour les inventaires forestiers fondés sur les zones
Goodbody <i>et coll.</i> 2020	4	BLA multispectral	Forêt expérimentale de Petawawa	Évaluation de la valeur du BLA multispectral pour la modélisation des attributs des inventaires forestiers
Goodbody <i>et coll.</i> 2021	2	BLA	À l'échelle du Canada	Examen de l'utilisation du BLA pour quantifier les critères et les indicateurs d'aménagement forestier durable
Herniman <i>et coll.</i> 2020	2	BLA, images satellites	Bassin hydrographique de la rivière Harry	Données combinées de BLA, de relevés par placettes, d'imagerie et topographiques pour quantifier le caractère convenable de l'habitat aviaire
Lamb <i>et coll.</i> 2017	2	BLA	District de Black Brook	Utilisation de données de BLA pour appliquer l'inventaire au niveau des arbres spécifique aux essences aux modèles de croissance des arbres et des peuplements
Lamb <i>et coll.</i> 2018	2	BLA	District de Black Brook	Élaboration d'une nouvelle approche pour prédire les variables d'inventaire forestier à l'aide du BLA
Luther <i>et coll.</i> 2019	1	BLA, Sentinel-2, PALSAR	Bassin hydrographique de la rivière Harry et environs	Combinaison de données de BLA et de données de satellite équipé de caméras à résolution moyenne pour accroître la portée des cartes des attributs forestiers
Marczak <i>et coll.</i> 2020	2	BLA	Forêt expérimentale de Petawawa	Utilisation des modèles de croissance et de rendement fondés sur les attributs forestiers reposant sur les données de BLA pour prédire le stock de carbone en surface
Mulverhill <i>et coll.</i> 2018	2	BLA	Slave Lake	Évaluation des caractéristiques structurelles reposant sur les données de BLA pouvant le mieux établir la distinction entre les peuplements unimodaux et bimodaux
Mulverhill <i>et coll.</i> 2019a	2	Photogrammétrie terrestre numérique (PTN)	Slave Lake	Évaluation de l'utilité de la photogrammétrie terrestre numérique pour estimer le volume et le défilement de la tige
Mulverhill <i>et coll.</i> 2019b	2	BLA	Slave Lake	Utilisation du BLA pour évaluer les différences dans le développement de la structure par type d'essence et de perturbation
Mulverhill <i>et coll.</i> 2020	2	Photogrammétrie terrestre numérique (PTN)	Slave Lake	Évaluation des conditions de peuplement à l'aide de la photogrammétrie terrestre numérique
Quinnec <i>et coll.</i> 2020	4	BLA	Dans l'ensemble du Canada	Trousse R sur l'extrapolation des données de BLA à l'aide de données optiques de satellite

Tableau 3. Liste d'articles évalués par les pairs publiés ou sous presse traitant de la recherche AWARE, y compris les auteurs, le thème AWARE, les ensembles de données utilisés, le site principal et un résumé (*suite*)

Publication	AWARE Thème	Type de données utilisées	Station AWARE	Résumé de la publication
Nuijten <i>et coll.</i> 2019	2	PAN, UAS, BLA	Edmundston (Nouveau-Brunswick)	Examen de l'influence du moment de l'acquisition par PAN sur l'exactitude de la détection des couronnes d'arbres individuels
Ravaglia <i>et coll.</i> 2019	2	BLT	Terre-Neuve-et-Labrador (ensemble de données simulées), Bas-Saint-Laurent (Québec)	Élaboration d'un algorithme pour l'estimation à l'aide des données de BLT du diamètre à hauteur de poitrine, du diamètre de la tige et du diamètre du tronc
Roussel <i>et coll.</i> 2017	2	BLA	Réserve forestière et faunique de Haliburton (Ontario)	Élaboration de méthodes pour comparer deux ensembles de données de BLA à différentes densités d'impulsions afin de corriger les mesures utilisées pour une APZ
Roussel <i>et coll.</i> 2018	2	BLA	Réserve forestière et faunique de Haliburton	Modélisation de l'effet de l'angle de balayage sur le biais de prédiction des mesures de BLA
Roussel <i>et coll.</i> 2020	4	BLA	–	Trousse lidR pour l'environnement R
Schmidt <i>et coll.</i> 2020	2	BLA	Bassin hydrographique de la rivière Harry	Élaboration d'un cadre pour cartographier les services écosystémiques à l'appui de l'aménagement forestier
Tompalski <i>et coll.</i> 2018	2	BLA, PAN	Slave Lake	Combinaison de données de BLA et de PAN pour fournir de l'information supplémentaire sur les projections de croissance à l'échelle du sous-peuplement
Tompalski <i>et coll.</i> 2019	2	BLA, PAN	Slave Lake	Utilisation des données de BLA et de PAN pour quantifier les changements dans la structure forestière dans une forêt mixte boréale très perturbée
Tompalski <i>et coll.</i> 2021	2	BLA	Dans l'ensemble du Canada	Examen de l'estimation des changements dans les attributs forestiers et de l'amélioration des projections de croissance à l'aide du BLA
van Ewijk <i>et coll.</i> 2019	2	BLA	Forêt expérimentale de Petawawa, forêt Hearst, réserve forestière et faunique de Haliburton	Vérification des prédictions des attributs d'inventaire au moyen des mesures de texture et d'intensité et des mesures de BLA basées sur la hauteur
van Ewijk <i>et coll.</i> 2020	2	BLA	Forêt Hearst, Slave Lake	Évaluation de la transférabilité des modèles d'attributs forestiers entre deux stations forestières boréales
van Lier <i>et coll.</i> 2020	2	BLA	Bassin hydrographique de la rivière Harry	Évaluation de l'effet de l'angle de balayage sur les mesures de placettes par BLA et les prédictions d'attributs forestiers à l'aide d'une APZ
Wylie <i>et coll.</i> 2019	2	BLA	Forêt Hearst	Établissement de modèles de prévision de l'âge moyen des tiges et de la qualité du bois des peuplements dominés par l'épinette noire
Yan et Shaker 2017	4	BLA multispectral	Forêt expérimentale de Petawawa, forêt Hearst, réserve forestière et faunique de Haliburton	Élaboration d'une approche de modélisation des effets de distorsion causés par la portée et l'angle dans les données de BLM
Yan <i>et coll.</i> 2020	4	BLA multispectral	Forêt expérimentale de Petawawa	Évaluation des corrections radiométriques du BLA multispectral pour l'exactitude de prédiction des attributs forestiers

jet AWARE, un éventail de méthodologies pour caractériser la croissance des forêts a été examiné. Celles-ci incluaient les méthodes employées pour estimer rétrospectivement les taux de croissance en fonction de deux ou plusieurs mesures dans le temps et les méthodes pour prévoir les attributs du peuplement en intégrant des ensembles de données de nuages de points multitemporels avec des simulateurs de croissance. Dans la première catégorie, les changements entre les acquisitions de données sont caractérisés à l'aide de la détection des changements fondée sur les nuages de points ainsi que des estimations de croissance à l'échelle de la cellule et de l'arbre. La deuxième catégorie comprend les méthodes qui incorporent les taux de croissance observés dans les attributs des forêts des nuages de points aux modèles existants de croissance de la productivité et de rendement des forêts ainsi que tirent parti de l'information sur les changements afin de concevoir de nouveaux modèles pour prévoir les attributs futurs des peuplements.

Le cas le plus simple de l'utilisation d'ensembles de données de nuages de points multitemporels pour caractériser rétrospectivement la croissance est la détection des changements dans les paramètres de nuage de points ou les attributs estimés à l'échelle de la cellule. Ces changements peuvent être caractérisés en appliquant deux approches différentes. Dans l'approche indirecte, des modèles indépendants sont utilisés pour prédire les attributs forestiers qui sont ensuite soustraits les uns des autres (Næsset et Gobakken 2005). Dans l'approche directe, un modèle unique est élaboré pour estimer les changements dans les attributs forestiers en utilisant les changements dans les mesures comme paramètres de prévision (Cao *et coll.* 2016). Les deux approches ont été appliquées et comparées à la station de Slave Lake (Tompalski *et coll.* 2019). Des nuages de points de BLA et de PAN de faible densité informant sur la structure du peuplement aux T1 et T2, respectivement, ont été utilisés pour quantifier les changements dans la hauteur dominante (H dom), le volume (V) et la surface terrière (ST). Selon Tompalski *et coll.* (2019), l'analyse de la croissance dans une forêt boréale très perturbée et à croissance lente est souvent difficile. L'exactitude la plus élevée des estimations de croissance a été enregistrée lorsque l'approche directe a été utilisée, avec un R^2 de 0,60 pour un changement dans la H dom. L'exactitude des estimations produites à l'aide de l'approche indirecte était nettement inférieure, avec des résultats particulièrement faibles pour la ΔST et le ΔV . Même si le BLA et la PAN ont tous deux facilité l'établissement de modèles de prévision des attributs forestiers au T1 et T2, en raison de la croissance lente et de la mortalité élevée des peuplements, l'erreur des modèles décrivant la croissance était souvent supérieure à la croissance même. Un tel résultat important permet aux aménagistes forestiers de prendre des décisions plus éclairées lors de la planification des futures acquisitions de données et fait ressortir l'importance de comprendre la mortalité des peuplements lors de l'analyse de la croissance.

En ce qui a trait à la deuxième catégorie, deux approches pour intégrer les simulateurs de croissance aux données de BLA ont été mises à l'essai dans le cadre du projet AWARE. La première étude a mis à profit le modèle de croissance et de rendement existant en Alberta (GYPSY; Huang *et coll.* 2009)) pour créer une bibliothèque de trajectoires de croissance (Tompalski *et coll.* 2018). La bibliothèque a ensuite été com-

binée aux attributs du peuplement à l'échelle de la cellule reposant sur les données de BLA afin de sélectionner une courbe de croissance ayant la plus proche correspondance. La méthode a utilisé les mêmes ensembles de données pouvant être obtenus à Slave Lake et appliqué une approche par zones (APZ) pour prédire la H dom, la ST, le V et la densité de peuplement (N) pour T1 et T2. Les courbes de rendement générées par GYPSY ont ensuite été mises en concordance avec les observations de télédétection 3D pour deux scénarios. Le premier scénario a utilisé les estimations de T1 seulement et le deuxième a combiné les estimations de T1 et T2, ce qui a augmenté le nombre de points de données utilisés pour sélectionner la courbe de croissance ayant la plus proche correspondance. Il est ressorti des résultats que les courbes mises en concordance avec deux points dans le temps comportaient une exactitude plus élevée et que l'erreur de prédiction des estimations de l'APZ constituait le principal facteur d'exactitude de correspondance de la courbe. L'erreur quadratique moyenne relative (EQMR) enregistrée dans les attributs prévus pour la H dom, la ST, le V et la N était de 13,2, 44,6, 50,4 et 12,3 %, respectivement.

Une deuxième étude misant sur l'intégration des simulateurs de croissance aux données de BLA disponibles pour le district de Black Brook, au Nouveau-Brunswick, (Lamb *et coll.* 2018) a utilisé un modèle de croissance avec liste d'arbre pour prédire l'inventaire forestier à une échelle de cellule de grille dans des plantations d'épinette. Une bibliothèque de listes d'arbres a d'abord été créée à partir des données de parcelles d'une zone beaucoup plus grande que l'acquisition par BLA. Les listes d'arbres ont ensuite été attribuées à chaque cellule aux 20 m selon la plus petite différence entre six attributs d'inventaire prédits avec le BLA et mesurés sur les parcelles. Les listes d'arbres assignées ont ensuite été utilisées pour paramétrer le modèle de croissance. Pour évaluer l'exactitude, les auteurs ont utilisé des données de parcelles indépendantes et comparé les augmentations annuelles obtenues au moyen des listes d'arbres imputées par correspondance des parcelles et des listes d'arbres mesurés sur le terrain. Il est ressorti des résultats une forte concordance (corrélation de Pearson de 0,75 à 0,86) entre les augmentations avec l'erreur quadratique moyenne se situant entre 12,8 et 49 %. Une fois les listes d'arbres assignées pour chaque cellule de la grille, le modèle de peuplement ouvert, qui a été étalonné pour la région forestière acadienne, a été appliqué concurremment avec les règles d'admissibilité à l'éclaircie commerciale afin de planifier d'un point de vue spatial l'éclaircie commerciale annuelle au cours des trois prochaines années.

Orientations futures

Les résultats des études liées à la croissance des forêts dans le cadre d'AWARE (Lamb *et coll.* 2018; Tompalski *et coll.* 2018, 2019), de même que la recherche qui a été réalisée par d'autres au cours de la même période (McRoberts *et coll.* 2015; Zhao *et coll.* 2017; Duncanson et Dubayah 2018; Noor-dermeer *et coll.* 2019), ont fait ressortir les problèmes non négligeables associés à l'estimation de la croissance à partir de données de nuages de points et établi que les approches actuelles ne sont pas encore prêtes à être opérationnalisées. Les articles cités plus haut mettent tous en lumière la nécessité de faire preuve de rigueur statistique lors de l'analyse de nuages de points multitemporels.

D'après les principaux résultats du projet AWARE, de la recherche supplémentaire est requise pour recommander quand des approches directes ou indirectes doivent être adoptées lors de l'analyse de la croissance à une échelle de cellule de grille et pour faire le point sur l'amélioration de la correspondance entre les arbres lors de l'exécution d'analyses à l'échelle de l'arbre individuel. Si la majorité des études à l'échelle de la cellule illustre que l'approche directe est plus exacte (p. ex. Cao *et coll.* 2016; Poudel *et coll.* 2018; Mauro *et coll.* 2019; Tompalski *et coll.* 2019), d'autres sont contradictoires (Økseter *et coll.* 2015; Goodbody *et coll.* 2016; Zhao *et coll.* 2017). Comme les ensembles de données multitemporelles 3D sont de plus en plus répandus partout au Canada, nous recommandons de vérifier les approches directes et indirectes dans la mesure du possible afin d'émettre des recommandations plus cohérentes quant à l'approche à appliquer dans les conditions forestières et du terrain présentes. À l'échelle de l'arbre individuel, une mise en correspondance solide des arbres au fil du temps passe par l'uniformité (et l'amélioration) des méthodes de détection d'arbres. Même si les méthodes de détection d'arbres individuels sont très nombreuses, celles-ci ont rarement été utilisées pour lier des ensembles de données multitemporelles ou pour évaluer la croissance fondée sur l'arbre individuel. Si les entreprises forestières souhaitent continuer à concevoir et appliquer des modèles fondés sur l'arbre individuel, ce qui est sans doute le cas, vu un intérêt grandissant pour les applications forestières de précision comme la récolte et l'éclaircie sélectives, alors un perfectionnement supplémentaire de ces méthodes s'impose.

Enfin, notre travail a mis en avant le besoin de réaliser d'autre recherche pour définir les façons les plus appropriées d'utiliser les données de nuages de points pour améliorer les projections découlant des modèles de croissance et de rendement. Comme l'a montré la recherche effectuée à Slave Lake (Tompalski *et coll.* 2018), les méthodes pour intégrer les données de nuages de points sont aux étapes d'élaboration et sont souvent conçues expressément pour être associées à un simulateur de croissance existant ou pour une région boisée précise. La recherche doit miser sur l'exploitation de l'information de nuages de points pour mieux paramétrer les simulateurs de croissance existants, p. ex. en améliorant les estimations de l'indice de qualité de station ou d'attributs similaires qui atténuent le recours à l'âge interprété à partir de photographies ou prédit à partir de nuages de points (Solberg *et coll.* 2019). Enfin, la recherche en cours doit se consacrer à la création de modèles de croissance axés entièrement sur les données de nuages de points. Il est indéniable que, partout au Canada, un grand nombre de modèles de croissance et de rendement existent avec une capacité limitée d'extrapoler les comparaisons croisées à l'ensemble du pays. Vu le coût associé à l'élaboration de simulateurs de croissance au moyen d'approches traditionnelles, la recherche devrait continuer à tenir compte des produits reposant sur la télédétection pour améliorer les estimations des modèles de croissance et de rendement. Actuellement, les fonctions de croissance utilisent souvent des modules complexes pour caractériser la mortalité, le recrutement et la concurrence ou tenir compte de diverses activités sylvicoles (p. ex. éclaircie, fertilisation). Il n'est pas nécessaire d'intégrer explicitement la totalité des solutions aux approches de BLA ou PAN; en comparant plutôt les nuages de points au fil du temps, nous pourrions avoir

une meilleure idée de l'incidence de la dynamique des peuplements ou des activités de gestion sur la structure et donc sur la croissance du peuplement.

Détection d'arbres individuels axée sur les opérations et prédiction des essences

L'approche AWARE

Pendant les cinq ans du projet AWARE, des IFA élaborés à l'aide d'une APZ reposant sur des données LiDAR ont été mis en service avec de nombreuses organisations forestières utilisant globalement cette approche. Cela étant, certaines décisions opérationnelles tireraient profit de renseignements supplémentaires à propos des peuplements forestiers au-delà des résumés statistiques rattachés à un ensemble de données matricielles quadrillé. De l'information sur l'espacement des arbres et la taille des couronnes individuelles est souvent requise pour appuyer la prise de décisions relatives à des applications sylvicoles de précision. En outre, comprendre la composition des essences des peuplements influe sur la prise de décisions relatives à la valeur, la santé et la productivité du bois. La délimitation d'arbres individuels (DAI) ou la segmentation constitue une solution de rechange à l'APZ (Chen *et coll.* 2006; Koch *et coll.* 2006). La segmentation précise d'arbres individuels pour extraire de l'information sur la position et les attributs de l'arbre comme la hauteur, le diamètre à hauteur de poitrine, le V et, finalement, l'essence, est une demande des chercheurs comme des intervenants pour des données de base. Les algorithmes de DAI utilisés avec les données de télédétection 3D peuvent généralement être divisés en deux types : les algorithmes fondés sur un modèle de hauteur de canopée (MHC) numérique et ceux qui utilisent le nuage de points original. La documentation sur la segmentation d'arbres individuels est considérable puisque cette dernière a été le point de mire de plusieurs comparaisons et examens complets (Ke et Quackenbush 2011; Wang *et coll.* 2016; Yancho *et coll.* 2019), avec la qualité de l'identification des espèces reposant en grande partie sur l'efficacité de la délinéation des couronnes (Yu *et coll.* 2011). Pour ce qui est des approches qui tirent parti du MHC, l'approche la plus courante consiste à détecter les maximums locaux, puis à utiliser un modèle de bassin hydrographique inversé pour trouver le périmètre de la couronne. Même si de nombreux algorithmes de DAI ont été créés et appliqués à de multiples types forestiers, il est apparu clairement pendant l'élaboration du projet AWARE que bon nombre de ces approches demeuraient dans le domaine de la recherche. En général, ces algorithmes sont écrits dans des logiciels développés pour des utilisateurs précis, ont seulement été appliqués à de petites zones et ont simplement été validés sur un très petit nombre d'arbres. Afin que les entreprises forestières puissent tirer parti de ces approches à l'échelle de l'arbre pour prédire les essences d'une manière opérationnelle, de nouvelles routines devront être développées et programmées pour permettre un déploiement et une application à grande échelle. Par conséquent, dans le cadre d'AWARE, une nouvelle approche de segmentation a été élaborée et permet (i) l'extraction de renseignements détaillés d'arbres individuels, y compris différents types de mesures structurelles et d'intensité et (ii) la programmation pour l'extrapolation à de vastes territoires opérationnels. Les éléments tels que le pavage des ensembles de données

LiDAR, l'élimination des effets de bord des pavés LiDAR sur les prédictions de couronnes et la mise en place de bases de données géospatiales robustes pouvant stocker l'information de DAI sont essentiels au succès d'une telle nouvelle approche. Une nouvelle approche de détection et de délimitation des couronnes, SEGMA, a été mise au point à partir de la détection des marqueurs et du bassin hydrographique. Cette approche lisse d'abord le MHC pour supprimer les creux, puis applique un filtre gaussien pour éliminer les variations causées par les effets de bruit et de bord. Ensuite, les maximums locaux sont établis et un algorithme du bassin hydrographique utilisant la contre-pente est appliqué à chaque marqueur définissant le contour de la couronne de l'arbre. La détection des maximums locaux est adaptée à la hauteur de la forêt locale de sorte que la sensibilité soit grande pour les couverts bas et plus faible pour les couverts hauts. Par la suite, la forme de la couronne fait alors office de masque, ou d'emporte-pièce, pour extraire les retours LiDAR de chaque couronne et ainsi définir et enregistrer le nuage de points pour chaque arbre dans un seul fichier « micro-LAS ». Surtout, SEGMA calcule ensuite toute une série de mesures pour chaque fichier micro-LAS et donc chaque arbre. Celles-ci comprennent des mesures se rapportant à la hauteur et à la variation de la hauteur (p. ex. pente moyenne entre chaque retour de couronne et le maximum local). Des mesures fondées sur l'intensité du retour sont aussi extraites en partant du principe que les propriétés réfléchissantes au rayonnement infrarouge diffèrent selon les genres d'essences (p. ex., l'intensité des feuillus est généralement supérieure à celle des conifères ; Schreier *et coll.* 1985). SEGMA a été appliqué au district de Black Brook et étalonné à l'aide d'un total de 1 500 arbres qui ont été mis en concordance sur le terrain avec la couche de couronnes délimitées. Lorsqu'il a été appliqué à l'ensemble du domaine, les résultats ont révélé qu'il y avait plus de 290 millions de couronnes segmentées des données LiDAR de BLA dans le district de Black Brook. Un modèle basé sur les forêts d'arbres décisionnels a ensuite été créé à partir des mesures d'arbre individuel et de couronne et des modèles conçus aux échelles des genres et de toutes les essences. Il est ressorti des résultats que le modèle le plus exact distinguait les feuillus des conifères (c.-à-d. classification correcte à 93 %). Parallèlement, l'exactitude globale était de 49 % pour les 11 essences dans la zone d'étude. Dans la plupart des cas, les arbres dont la classification était erronée étaient d'une essence similaire dans le contexte de l'aménagement forestier. Du point de vue des mesures, les résultats des modèles de forêt d'arbres décisionnels ont indiqué que l'écart type des premiers retours et de tous les retours, l'intensité maximale et l'intensité moyenne constituaient les paramètres de prévision les plus importants des essences dans la zone. Parmi les mesures structurelles, l'inclinaison de la couronne était la plus importante pour délimiter les essences (Perron 2018).

Faisant fond sur les travaux préparatoires initiaux de SEGMA, l'outil a par la suite été appliqué à la Forêt expérimentale de Petawawa (FEP) (White *et coll.* 2019) pour examiner si les récents progrès de la technologie LiDAR pouvaient améliorer les résultats antérieurs de segmentation et de classification. Deux avancées dans la technologie LiDAR ont vu le jour durant le projet AWARE. D'abord, le BLA multispectral a été lancé (Fernandez-Diaz *et coll.* 2016) avec des sys-

tèmes LiDAR à trois longueurs d'onde spectrales réglées aux régions verte, au proche infrarouge et à l'infrarouge de courte longueur d'onde du spectre, permettant ainsi d'obtenir d'autres mesures reposant sur l'intensité (Budei *et coll.* 2018) et de les comparer aux systèmes de BLA monospectral utilisés auparavant. Ensuite, la densité de points du BLA est une fonction de l'altitude de vol et de la vitesse de vol pour une fréquence de répétition des impulsions donnée, qui se traduit par une relation directe entre le coût (\$/km²) d'acquisition et la densité de points (points/m²). Les chercheurs ont commencé à étudier les instruments à comptage de photons conçus pour couvrir des zones plus étendues au même coût dans les années 1990 (Priedhorsky *et coll.* 1996). Les systèmes LiDAR à photon unique (LPU) (Degnan 2002) pallient les inconvénients constatés sur le plan du coût des systèmes de BLA linéaire classiques en favorisant une densité de points plus élevée pour une altitude de vol donnée (Li *et coll.* 2016) ou en atteignant des densités de points acceptables à plus haute altitude (Swatantran *et coll.* 2016), ce qui permet une plus grande couverture. Donc, nous avons aussi examiné si les éléments supplémentaires fournis par le BLA multispectral ou la densité de points plus élevée offerte par le LPU sont importants pour l'évaluation de la DAI et des essences. Trois différents ensembles de données de BLA constituaient la comparaison : données de BLA monospectral (Riegl 680i, 1064 nm) acquises en 2012 (ALS12), données de BLA multispectral (Optech Titan, 532, 1064 et 1550 nm) acquises en 2016 (MSL16) et données du LPU (Leica SPL100, 532 nm) acquises en 2018 (SPL18). Des couronnes d'entraînement de référence ont été échantillonnées et identifiées avec SEGMA sur l'ensemble de données de BLA monospectral de 2012 et mises en concordance avec les ensembles de données des couronnes sur le terrain compilés par les interpréteurs photos du ministère des Ressources naturelles de l'Ontario et les chercheurs d'AWARE. Les modèles fondés sur les données du LPU affichaient une exactitude globale légèrement inférieure à celle des systèmes de BLA conventionnels. De plus, les ratios des premiers et deuxièmes retours, qui s'étaient avérés très importants pour l'évaluation des essences, (Genuer *et coll.* 2015) n'étaient pas des paramètres de prévision significatifs dans les modèles du LPU en raison des différences dans la technologie, ce qui pourrait également expliquer leurs moins bons résultats.

Sans surprise, la forte densité de peuplement des forêts où dominant les feuillus, comme la FEP, diminue l'efficacité de la classification lorsqu'elle est comparée aux peuplements plus ouverts. La DAI (et l'identification ultérieure des couronnes d'entraînement sur le terrain) dans un tel type d'environnement est difficile et peut introduire des omissions et erreurs réelles au moment d'identifier les couronnes d'arbres dans de telles conditions. Le nombre relativement faible d'échantillons d'entraînement par classe (30 couronnes pour certaines classes) à un tel niveau de granularité limite également l'exactitude de la classification. Les taux d'exactitude de la classification des feuillus/conifères, du groupement fonctionnel et des quatre essences, toutefois, sont prometteurs (taux d'exactitude > 70 %) dans les trois ensembles de données. Les résultats donnent à penser que les éléments supplémentaires fournis par le BLA multispectral sont plus utiles pour l'exactitude de la classification que la densité de points plus élevée offerte par le LPU.

Orientations futures

À en juger par la recherche menée dans le cadre d'AWARE sur la DAI, la délimitation des couronnes d'arbres demeure un domaine clé devant être amélioré. Les erreurs dans la délimitation produisent une série d'effets en aval qui jouent grandement sur les évaluations des essences fondées sur l'arbre individuel. En outre, des délimitations imparfaites nuisent au repérage des couronnes sur le terrain, ce qui pose problème pour établir une correspondance entre les mesures de couronnes de BLA et les essences, étant donné que les classificateurs plus perfectionnés comme les forêts d'arbres décisionnels d'apprentissage machine sont extrêmement sensibles au bruit dans les ensembles de données. Une analyse supplémentaire des prédictions d'essences donne également à penser, comme d'autres l'ont fait par le passé, qu'une délimitation précise de la couronne entière pourrait bien ne pas être nécessaire, surtout lorsque plusieurs longueurs d'onde sont utilisées. L'identification des parties supérieures de la couronne, puis des parties de la surface, comme la couronne éclairée par le soleil, en imagerie optique passive demeure une approche moins complexe qui peut fournir des taux d'exactitude similaires. Également, d'après les résultats, la prédiction exacte de toutes les essences est complexe dans les peuplements comptant de nombreuses essences. Cependant, si les essences sont regroupées selon le type fonctionnel, la valeur ou la forme, l'exactitude des essences regroupées augmente considérablement. La définition d'une résolution spatiale afin de produire des prédictions agrégées pouvant être à la fois exactes et mises à l'échelle adéquatement pour appuyer la prise de décisions sylvicoles sera primordialement pour l'utilisation pratique de tels modèles. Plutôt qu'aux couronnes d'arbres individuels, les travaux futurs se consacreront à faire des prédictions sur la composition forestière dans des cellules de 20 x 20 m avec une exactitude compositionnelle évaluée à des échelles plus vastes que les couronnes individuelles, comme à l'échelle d'un hectare. Enfin, l'élaboration supplémentaire de modèles d'identification des essences nécessitera également un meilleur accès à des inventaires de données terrain spatialement explicites des tiges individuelles, en particulier lorsque sont utilisés des classificateurs d'apprentissage machine plus perfectionnés, pour lesquels les données d'entraînement sont cruciales. S'il est vrai que 1500 couronnes identifiées individuellement peuvent sembler beaucoup dans un contexte de foresterie de télédétection et de terrain, il s'agit d'un très petit échantillon dans le domaine de l'apprentissage machine. De la recherche supplémentaire s'impose en vue d'examiner si nous pouvons augmenter les données d'entraînement avec d'autres ensembles de données ou des interprétations manuelles pour élargir l'ensemble d'apprentissage de ces classificateurs. L'étiquetage, ou l'annotation, des couronnes d'entraînement est aussi problématique lorsque nous entreprenons d'associer les couronnes produites par ordinateur aux couronnes sur le terrain. Les couronnes d'entraînement mal étiquetées occasionnent une perte d'exactitude et de capacité prédictive lorsque de telles approches d'apprentissage machine sont appliquées.

Balayage LiDAR terrestre à l'appui de l'inventaire forestier amélioré

L'approche AWARE

Les inventaires forestiers fondés sur le BLA reposent sur des modèles de prévision obtenus à partir des données de réf-

rence recueillies pendant les mesures sur le terrain. L'exactitude de ces modèles est tributaire de la capacité prédictive de variables indépendantes fondées sur les nuages de points (p. ex. paramètres de nuage de points), mais aussi de la qualité de ces données de référence sur le terrain. Bien que les protocoles de collecte de données en place permettent de créer des prédictions détaillées uniformes des attributs à l'échelle de la cellule du peuplement, ces attributs se limitent à ceux mesurés sur le terrain. Les attributs de l'arbre individuel qui décrivent la forme de la tige ou de la couronne, le nombre de verticilles, la branchaison et la hauteur à la base de la cime, par exemple, sont beaucoup plus difficiles à mesurer sur le terrain avec les méthodes conventionnelles, mais fournissent néanmoins de l'information précieuse sur la structure du peuplement forestier et la qualité du bois et peuvent renseigner sur les activités sylvicoles nécessaires, comme l'éclaircie, et contribuer à améliorer l'exactitude des modèles de l'APZ.

Grâce au très grand niveau de précision spatiale des nuages de points du BLT, les données recueillies sur les parcelles de référence permettent l'obtention d'information sur la structure forestière très détaillée et rendent ainsi possible la caractérisation d'importants attributs de l'arbre individuel. En raison de la portée limitée à travers un peuplement forestier et de l'occlusion, le BLT est mieux adapté à la saisie de petites zones (comme des parcelles de forêts), ce qui permet d'améliorer les données de référence qui peuvent ensuite être utilisées dans la modélisation de grandes zones ou la mise au point de modèles allométriques. Un tel exemple de la façon dont les données de BLT peuvent servir à améliorer la caractérisation de la forêt effectuée avec des nuages de points du BLA a été illustré dans le projet AWARE par Côté *et coll.* (2018), au moyen duquel des nuages de points du BLT et un modèle d'architecture (*L-Architect*) ont été utilisés pour créer des parcelles de référence 3D « virtuelles », qui à leur tour ont été utilisées pour produire une bibliothèque de modèles d'arbres. Des placettes de remplacement peuvent ensuite être créées en fonction d'un ensemble standard d'attributs de l'arbre estimés à l'aide des mesures sur le terrain ou des données de BLA. En constituant une bibliothèque d'arbres numérisés en 3D, l'application des données de BLT est étendue au-delà des parcelles où les données ont été recueillies et permet la création de placettes de remplacement dès que les données requises sur l'arbre individuel sont disponibles. Introduire des placettes de remplacement aux flux de production de l'IFA peut améliorer l'exactitude des prédictions et permettre l'estimation d'attributs structuraux à échelle fine de l'arbre et de la forêt.

Un autre exemple de capacité améliorée d'estimer les attributs forestiers est illustré par Côté *et coll.* (2020), qui a associé des modèles d'attributs structuraux d'arbre étalonnés avec des données de BLT à des attributs de la fibre de bois à Terre-Neuve-et-Labrador. Les attributs structuraux obtenus de *L-Architect* décrivant la géométrie de la couronne, la ramification, la forme des tiges, la compétition spatiale et la distribution du couvert ont été utilisés pour élaborer des modèles de prévision des attributs de la fibre de bois. Le pourcentage d'écart expliqué pour les attributs de la fibre de bois se situait entre 12 et 56 % et entre 5 et 80 % aux échelles de l'arbre et de la parcelle respectivement, et s'améliorait par rapport aux modèles conçus uniquement à partir des attributs d'inventaire de 23 % (échelle de l'arbre) et 33 % (échelle de la par-

celle). Une meilleure caractérisation de la structure forestière à l'aide du BLT et de la modélisation architecturale peut donc se traduire par de meilleures prédictions de la qualité du bois dans l'IFA.

Dans le cadre d'AWARE, les ensembles de données de BLT ont été acquis dans plusieurs sites principaux. De nouvelles méthodes ont été mises au point pour détecter automatiquement et caractériser les arbres individuels dans les nuages de points du BLT. Parmi les attributs de l'arbre individuel qui peuvent être obtenus des données de BLT, le diamètre à hauteur de poitrine et le diamètre de la tige à différentes hauteurs sont souvent considérés comme les plus essentiels. Ravaglia *et coll.* (2019) a comparé trois algorithmes couramment utilisés pour estimer le diamètre de la tige : STEP (*Snakes for Tuboid Extraction from Point cloud*), Computree et SimpleTree. L'algorithme STEP, développé à l'origine par Ravaglia *et coll.* (2017), était expressément conçu pour estimer le profil de la tige dans des milieux forestiers naturels. Les trois algorithmes ont été testés dans plusieurs écosystèmes forestiers, y compris des forêts où dominent le sapin baumier et l'épinette noire à Terre-Neuve-et-Labrador et une plantation d'épinettes blanches au Québec. Il a été établi que l'algorithme STEP était le plus exact, avec des erreurs dans le diamètre moyen de la tige entre 1,1 cm et 2,28 cm.

Les travaux de Crespo-Peremarch *et coll.* (2020) ont également appelé l'attention sur le recours au BLT pour appuyer l'établissement d'IFA en évaluant comment les données de BLA à formes d'ondes complètes pouvaient définir et estimer la densité du sous-étage. L'étude a utilisé des ensembles de données du bassin hydrographique de la rivière Harry, à Terre-Neuve-et-Labrador, et d'une deuxième station en Espagne. Elle a démontré que le BLT fournit de précieuses estimations des attributs structuraux des arbres et des peuplements complexes qui peuvent ensuite servir de données de référence pour étalonner les données de BLA à formes d'ondes complètes. Les résultats des travaux confirment en outre que les données de BLA à formes d'ondes complètes surpassent largement la capacité du BLA à retours discrets à caractériser le sous-étage de la végétation.

Orientations futures

Dans le cadre d'AWARE, il a été illustré que l'intégration du BLT aux IFA fondés sur le BLA est possible pour plusieurs applications potentielles : (i) pour l'estimation directe d'attributs structuraux complexes, (ii) pour appuyer la modélisation de l'architecture afin de généraliser les données d'inventaire virtuelles, (iii) pour augmenter la disponibilité des variables indépendantes à échelle fine à l'appui de la modélisation, p. ex. les attributs de la fibre de bois, et (iv) pour valider le développement de modèles complexes. De plus, le développement de nouveaux algorithmes pour extraire des éléments clés d'information des nuages de points du BLT peut être adapté aux nouveaux instruments qui fournissent des nuages de points haute densité comme la technologie LiDAR portative ou la technologie LiDAR montée sur des UAV. De telles nouvelles approches sont maintenant accessibles dans les boîtes à outils à source ouverte de traitement des données de BLT, comme Computree. Malgré les progrès, un développement de modèles continu et de l'analyse sont requis pour que les approches reposant sur le BLT soient davantage répandues comme moyen de recueillir des données de référence pour les modèles de l'APZ. Nous devons

continuer à examiner les aspects opérationnels de l'acquisition et du traitement des données de nuage de points sur le terrain et de la sélection des meilleures méthodes pour identifier les arbres individuels et estimer leurs attributs, puis intégrer ces attributs aux modèles basés sur les zones.

Applications de la technologie LiDAR au-delà des inventaires forestiers

L'approche AWARE

Si les projets dans le cadre d'AWARE visaient précisément à examiner le rôle des technologies 3D pour répondre aux besoins d'inventaire par, notamment, la création d'IFA, il était clairement admis que les coûts d'acquisition de données constituent un aspect considérable de la mise en place de tout système d'inventaire fondé sur la technologie LiDAR. En outre, les coûts associés à la collecte d'ensembles de données de terrain et au traitement des données pour l'élaboration de modèles doivent être pris en considération (White *et coll.* 2017). Par conséquent, utiliser des données d'inventaire pour mettre essentiellement en évidence et exposer la production du bois peut être hors de prix et ainsi dissuader les aménagistes forestiers d'avoir recours à de telles solutions éprouvées, mais encore perçues comme plus chères.

Une solution reconnue dans AWARE consistait à illustrer comment ces ensembles de données 3D acquis pour appuyer l'établissement d'inventaires pourraient être utilisés pour caractériser une gamme d'autres biens et services écologiques qu'offre l'écosystème forestier au-delà du bois d'œuvre (Schmidt *et coll.* 2020). Il a ainsi été explicitement admis que les forestiers doivent prendre des décisions d'aménagement durable rendant compte de bien plus que les valeurs ligneuses et que les données de télédétection 3D ont un rôle à jouer dans l'estimation de ces attributs supplémentaires (Guo *et coll.* 2017). Le maintien et l'amélioration des éléments et processus d'écosystème essentiels comme la biodiversité, les sols, l'eau et la composition végétale sont fondamentaux pour l'aménagement forestier durable continu, et les données sur de telles composantes non ligneuses de l'écosystème permettent la quantification des biens et services écologiques forestiers.

En ce qui a trait à la biodiversité des forêts dans le cadre d'AWARE, Herniman *et coll.* (2020) ont lié la présence et l'abondance d'espèces aviaires avec les mesures structurales LiDAR dans le bassin hydrographique de la rivière Harry, à Terre-Neuve-et-Labrador. Il est ressorti des résultats que les mesures LiDAR seules donnaient des modèles significatifs, mais avec un ajustement inférieur que les mesures de parcelle de terrain classiques. Les mesures spectrales satellites plus conventionnelles seules n'ont pas été en mesure de produire des modèles significatifs. La principale conclusion était que les modèles qui combinaient les données LiDAR et environnementales présentaient une meilleure qualité de l'ajustement que ceux reposant seulement sur les données de terrain, ce qui permet de penser que l'intégration des données LiDAR avec d'autres données géospatiales peut produire des modèles améliorés pour l'évaluation de la biodiversité dans un contexte d'IFA (Herniman *et coll.* 2020).

Un deuxième exemple se rapportait à l'élaboration de méthodologies pour estimer les propriétés du sol à l'aide d'ensembles de données de télédétection 3D avancée. Même si le concept de cartographie numérique du sol, où les attributs du sol d'intérêt sont estimés à partir d'une série de

couches de surface numériques comme le climat, l'état de la végétation au-dessus du sol et les caractéristiques du terrain comme la pente, l'aspect et la courbure, existe depuis plus de deux décennies (McBratney *et coll.* 2003; Lagacherie et McBratney 2006), avec les progrès dans les technologies de télédétection, il y a lieu de réexaminer la question avec l'ajout de nouveaux paramètres de prévision à haute résolution. L'orientation du projet a été établie en partie pour donner suite au succès de l'initiative de cartographie des zones humides en Alberta, qui a fourni des couvertures uniformes de la hauteur de la nappe phréatique d'après des MNT reposant sur la technologie LiDAR. Ces MNT comptaient diverses applications, y compris l'accessibilité et la traficabilité pour les opérations forestières, particulièrement en hiver (White *et coll.* 2012). Dans le projet AWARE, Furze *et coll.* (2017a), en travaillant au district de Black Brook, au Nouveau-Brunswick, a montré les possibilités de l'utilisation de multiples ensembles de données de terrain pour améliorer la cartographie des types et des propriétés de sol. Des techniques de fusion de données ont été employées pour inclure les données topographiques dérivées du LiDAR et les couches d'élévation de la Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) afin de réduire les biais d'élévation et de faciliter l'estimation des propriétés du sol et la cartographie multiéchelle. Des données de prospection pédologique de partout au Nouveau-Brunswick ont été utilisées pour créer une base de données spatiale du sol, concevoir des modèles de pédotransfert et prédire les descriptions de profil pédologique à des profondeurs variables. Ces données ont été combinées à des dérivées de terrain et à la géologie superficielle pour modéliser et cartographier les propriétés du sol dans l'ensemble de la province. Les couches ont prédit un éventail d'attributs, y compris le drainage, la texture (sable, limon et argile), la profondeur du solum et les horizons A et B, la teneur en fragments grossiers, la teneur en matière organique du sol et la masse volumique apparente.

Un autre aspect important de l'amélioration des inventaires forestiers se rapporte à l'élargissement des utilisations pour les systèmes de classification écologique des terres. Des études antérieures ont mis en évidence la possibilité de prédire la densité moyenne du bois et la longueur de la fibre d'essences clés comme l'épinette noire à partir d'attributs à l'échelle du polygone comme l'écosite ou le régime d'humidité (Pokharel *et coll.* 2014 ; Townshend *et coll.* 2015). Cependant, l'application de tels modèles se limitait aux peuplements jeunes (p. ex. ≤ 50 ans), car les attributs de la fibre des arbres individuels sont dictés par les changements dans la croissance au fil du temps (Lachenbruch *et coll.* 2011), et les différences entre les stations dans la qualité du bois peuvent être confondues par l'âge. Un projet d'AWARE s'est intéressé à l'utilisation de variables dérivées du LiDAR dans une approche des k plus proches voisins (kNN) pour prédire l'âge moyen des tiges dans des peuplements dominés par l'épinette noire de la forêt boréale du nord-est de l'Ontario, puis au perfectionnement des modèles de densité spatiale du bois pour l'épinette noire afin d'inclure l'âge et l'écosite comme paramètres de prévision (Wylie *et coll.* 2019). L'appariement des données LiDAR et de l'écosite dans le processus a fourni des estimations de la densité du bois d'une exactitude comparable aux approches précédentes, tout en élargissant l'éventail de conditions selon lesquelles elles peu-

vent être appliquées aux peuplements dominés par des arbres pouvant atteindre 120 ans.

Enfin, un domaine d'intérêt clé pour les aménagistes forestiers partout au Canada consiste à tirer parti des données de télédétection pour concevoir des méthodes améliorées afin de comprendre les changements dans la santé et l'état de la forêt. Dans l'est du Canada, la tordeuse des bourgeons de l'épinette (*Choristoneura fumiferana* (Clem.)), Lépidoptères : Tortricidés) est un insecte défoliant indigène jouant un important rôle perturbateur dans les forêts boréales. AWARE a appuyé un certain nombre de projets axés sur le sujet. Au sol, un projet d'AWARE a évalué l'utilisation d'images hémisphériques sur le couvert forestier pour quantifier la défoliation causée annuellement par la tordeuse des bourgeons de l'épinette au Québec (Donovan *et coll.* 2018). Des images ont été obtenues avant et après les phénomènes de défoliation, puis comparées pour relever les différences. Les changements dans la fraction de trouées constatés sur les images ont ensuite été utilisés pour évaluer les facteurs de changement du couvert, y compris la pulvérisation des insecticides et la proportion de la surface terrière de sapin baumier. À en juger par les résultats, l'imagerie numérique au sol du couvert offre une méthode non destructive matériellement possible et objective d'évaluer les changements au feuillage du couvert causés par la défoliation de la tordeuse des bourgeons de l'épinette. Lier les observations mesurées sur le terrain des phases de déclin aux nuages de points LiDAR peut être difficile. Les levés au sol ont également été associés à des observations hyperspectrales par satellite pour prédire les classes de défoliation sur des zones plus vastes, avec des taux d'exactitude considérablement plus élevés que pour la défoliation des levés aériens (Donovan *et coll.* 2021). Les données LiDAR à simple longueur d'onde conventionnelles sont généralement inefficaces pour détecter les petits changements dans l'état de la forêt. En raison de l'information insuffisante sur l'absorption des pigments ou la structure de la feuille fournie par l'impulsion laser, ces données peuvent difficilement communiquer les changements. Par conséquent, souvent, les changements dans la chlorophylle ou d'autres pigments ne peuvent être extraits facilement d'un nuage de points LiDAR, ce qui limite son application pour évaluer la santé et les premiers stades du dépérissement des forêts. En revanche, le développement de nuages de points de la PAN, qui fournissent de l'information spectrale à partir d'imagerie aérienne, offre la possibilité de produire des mesures qui décrivent l'information générale sur les pigments et la structure de la feuille (Goodbody *et coll.* 2019). Cela est particulièrement le cas lorsque l'imagerie aérienne à proche infrarouge est utilisée ; celle-ci s'est avérée des plus utiles pour détecter les faibles niveaux de dommages au feuillage et de déclin en raison d'insectes et d'agents pathogènes.

Un autre projet a été entrepris à la forêt Gordon Cosens, au sud de Kapuskasing, en Ontario. Le projet a évalué la capacité des nuages de points de PAN à haute résolution spatiale à prédire la défoliation cumulative dans les peuplements hôtes de la tordeuse des bourgeons de l'épinette (Goodbody *et coll.* 2018). Un cadre de modélisation partielle par les moindres carrés a été adopté pour vérifier si la défoliation cumulative était détectable à l'aide de mesures structurelles reposant sur la PAN ainsi que pour donner un aperçu de l'efficacité relative des mesures spectrales (p. ex. indice de végé-

tation par différence normalisée moyen) par rapport aux mesures structurales (p. ex. 90^e percentile de hauteur), ou de leur combinaison, pour estimer la défoliation cumulative. Il est ressorti des résultats que les mesures spectrales estimaient le plus efficacement la défoliation cumulative ($R^2 = 0,79$). Les mesures structurales étaient quant à elle moins efficaces ($R^2 = 0,49$). Les mesures caractérisant l'écart dans les valeurs spectrales se sont avérées les paramètres de prévision les plus importants. Si les mesures spectrales pouvaient mieux modéliser la défoliation cumulative, les mesures structurales étaient plus efficaces pour estimer les attributs d'inventaire types comme le volume et la surface terrière. À en juger par les résultats, les mesures structurales et spectrales toutes deux fournies par un seul levé aérien pris en vol de manière conventionnelle pourraient bien améliorer la surveillance de la défoliation et la modélisation de l'inventaire forestier.

Orientations futures

L'utilisation optimale des données LiDAR au sein des organisations forestières est cruciale pour assurer leur rentabilité. Les projets dans le cadre d'AWARE montrent que les caractérisations statistiques de la végétation et du terrain sont des plus utiles pour caractériser et surveiller les conditions du milieu. La valeur ajoutée que peuvent offrir les données LiDAR pour la cartographie numérique du sol, circulation de l'eau, la biodiversité et la santé des forêts est mise en évidence dans Goodbody *et coll.* (2020). Selon l'étude, les avantages supplémentaires que peuvent procurer les données LiDAR à l'IFA peuvent se résumer en quatre points principaux. Premièrement, les attributs écologiques établis par la technologie LiDAR doivent être de nature continue, de taux d'exactitude définis et spatialement explicites. Les attributs écologiques possédant de telles caractéristiques contribueront aux résultats de gestion (Coops et Wulder 2019). L'utilisation de la technologie LiDAR appuie la création continue d'attributs écologiques, ce qui permet de les utiliser à des fins multiples et de les adapter. Il est clairement reconnu que les données dans les systèmes d'inventaire peuvent être exploitées et améliorées pour fournir de l'information à propos des biens et services écologiques afin de profiter à d'autres domaines au-delà de la récolte. Deuxièmement, il devrait y avoir de la consultation et une réflexion sur la définition et la normalisation des paramètres d'acquisition des données LiDAR comme la densité de points, le recouvrement et l'angle de balayage afin de s'assurer qu'ils répondent à une diversité de besoins étant donné que les caractéristiques pour la création de modèles numériques de terrain peuvent différer de celles pour l'estimation du volume ligneux. Troisièmement, la priorité doit être accordée à l'intégration de produits reposant sur la technologie LiDAR aux flux de production de traitement et modèles disponibles. Pour faire en sorte que les données puissent être utilisées à des fins multiples et adaptées, plusieurs produits standards peuvent reposer sur les données LiDAR. Par exemple, créer un MNT est une première étape fondamentale pour estimer les attributs de l'eau et du sol. Un MHC est également un produit LiDAR relativement standard qui peut être utilisé pour mesurer la hauteur d'arbre et la hauteur dominante en ayant des liens directs avec la structure forestière et éventuellement l'habitat des animaux. Quatrièmement, les aménagistes forestiers doivent s'interroger sur la meilleure façon d'intégrer les indicateurs de biens et

services écologiques reposant sur la technologie LiDAR aux inventaires pour s'assurer que tous les utilisateurs des produits connaissent bien les avantages et inconvénients potentiels de tels types de données dans les prédictions liées à l'écosystème. L'intégration requiert des systèmes logiciels qui offrent une flexibilité dans le traitement des données afin de produire les résultats visés et qui, combinés à des systèmes de stockage et de gestion des données, sont en mesure d'utiliser et de résumer facilement les ensembles de données matricielles.

Résultats et leçons tirées d'AWARE

Données et outils

Le projet AWARE laisse de multiples legs qui continueront d'appuyer l'industrie forestière canadienne par la voie d'activités de recherche et développement (Tableau 2). Le premier de ceux-ci est une série d'ensembles de données pour les sites principaux à l'échelle du pays, dont bon nombre peuvent être utilisés librement et gratuitement par les autres chercheurs. Deux ensembles de données clés qui ont été obtenus comprennent les données LiDAR multispectrales de 2016 du système Titan de Teledyne Optech acquises sur la FEP, en Ontario, et un ensemble de données LiDAR haute densité à formes d'ondes complètes acquises sur le bassin hydrographique de la rivière Harry, à Terre-Neuve-et-Labrador. L'acquisition sur la FEP vient s'ajouter à l'importante base de données existante d'imagerie et de données de placettes à cette forêt expérimentale centenaire dont le Centre canadien sur la fibre de bois en a fait récemment en 2019 un super site de télédétection et un centre d'innovation (White *et coll.* 2019). Outre les acquisitions de données de télédétection, des ensembles de données de terrain ont également été compilés pour les zones en question et sont dans bien des cas disponibles avec les données de télédétection pour faciliter l'interprétation et l'analyse.

Un deuxième legs du projet AWARE est la production de logiciels et progiciels pouvant être utilisés par les chercheurs comme par les intervenants pour le traitement LiDAR. La première de ces troupes est lidR, une boîte à outils libre et ouverte offrant la possibilité de manipuler les données LiDAR pour élaborer une vaste gamme de produits. La rédaction dans le langage de programmation R de source ouverte permet la visualisation, l'interrogation et l'édition du code, et la trousse comprend une diversité d'outils pour permettre aux utilisateurs de prédire les résultats dérivés du LiDAR à l'échelle des arbres individuels et basés sur les zones. De plus, grâce au langage de programmation très flexible, les attributs peuvent reposer sur les nuages de points 3D aux échelles du point, de l'arbre et de la grille. Une telle flexibilité, conjuguée au fait que la trousse R sert de référentiel pour de nombreuses routines et de nombreux algorithmes publiés dans la littérature, explique vraisemblablement l'adoption rapide de cette trousse, en particulier par les utilisateurs du milieu scientifique. lidR est disponible sur le site CRAN figurant à la fin du présent article. Un deuxième logiciel issu d'AWARE est le programme SEGMA susmentionné. Ce programme a été conçu expressément par les chercheurs d'AWARE afin de permettre la délimitation d'arbres individuels sur de vastes zones en mode opérationnel. Nombre de programmes de délimitation d'arbres individuels existants ont connu des problèmes de mémoire lorsqu'ils ont été appli-

qués à de grandes zones. Un avantage clé de l'architecture SEGMA réside dans la possibilité d'effectuer des extractions à l'échelle de l'arbre individuel dans de très gros ensembles de données LiDAR en mode série ou parallèle. Une fois les arbres individuels extraits, SEGMA produit également un grand nombre d'attributs à l'échelle de l'arbre individuel qui peuvent ensuite être utilisés pour orienter l'estimation d'autres attributs à l'échelle de l'arbre comme la hauteur, le volume, les caractéristiques de la couronne et l'essence. La série de programmes SEGMA est également offerte gratuitement aux utilisateurs qui désirent appliquer des approches fondées sur l'arbre individuel à de vastes zones. Des trousseaux R supplémentaires pour étendre les observations LiDAR à des zones plus grandes à l'aide de données satellites (comme FOSTER, extrapolation de la structure forestière avec R) ont aussi été conçues (Quinnec *et coll.* 2021).

Avantages

Le projet AWARE a été conçu stratégiquement pour réunir des universitaires, des chercheurs et des gestionnaires du secteur privé et des organismes gouvernementaux afin de répondre à des questions de recherche pertinentes à propos de l'évaluation des technologies de télédétection 3D pour les inventaires forestiers. Afin de favoriser une collaboration efficace tout au long du projet AWARE, un certain nombre de structures organisationnelles ont été mises en place durant la planification du projet et mises en œuvre pendant le projet quinquennal. Pour chaque projet de recherche mené par un étudiant diplômé à la maîtrise ou au doctorat, les comités de supervision étaient encouragés à inclure dans leurs membres un représentant de l'industrie ou du gouvernement, ou des deux. Dans le cadre d'AWARE, cela a souvent été le cas, et de nombreux étudiants ont profité de l'information fournie par les entreprises et les chercheurs du gouvernement sur leur projet. Une telle collaboration s'est traduite par plusieurs avantages tangibles, y compris la capacité des collaborateurs de l'industrie de s'assurer que les résultats de recherche s'harmonisaient de plus près avec les besoins de l'industrie, de même qu'aider à mieux faire connaître les autres approches et méthodologies que les chercheurs des gouvernements et de l'industrie pourraient souhaiter voir appliquer. Parmi les exemples de réussite, notons la création de données à haute résolution spatiale sur les propriétés du sol qui ont pu être intégrées aux systèmes d'inventaire forestier au sein de JD Irving Limited au Nouveau-Brunswick, l'examen de la nouvelle assignation des attributs LiDAR à des zones spatialement plus étendues pour permettre des évaluations d'inventaire forestier à grande échelle à Terre-Neuve-et-Labrador et l'utilisation de nouvelles technologies comme la PAN pour orienter les programmes d'inventaire forestier partout au Canada.

Un deuxième avantage tangible du projet AWARE a été la mise en place et la promotion de sites principaux partout au pays pour circonscrire l'activité de recherche. En définissant ces sites principaux avec l'industrie au commencement du projet, les activités de recherche ont pu être centrées sur des sites communs, et les entreprises, les gouvernements et les étudiants ont ainsi pu tirer parti d'ensembles de données communs, de visites sur le terrain et de l'harmonisation des questions de recherche. Parallèlement, un partenariat avec

Optech inc. a permis d'utiliser le système LiDAR multispectral Titan à la FEP pour vérifier l'utilité des données LiDAR multispectrales pour des applications d'inventaire forestier.

Un troisième avantage du projet AWARE a été la collaboration continue de l'industrie et du gouvernement avec le milieu universitaire par la voie de réunions régulières de groupe de travail sur les sites principaux, de forums dans le cadre desquels les étudiants ont pu présenter leurs nouveaux résultats entre pairs ainsi que d'assemblées générales annuelles qui ont permis aux étudiants de présenter leurs résultats aux chercheurs du gouvernement et de l'industrie de manière cordiale et constructive. Pour s'assurer que les méthodes et les résultats s'harmonisaient avec les pratiques exemplaires et les besoins de l'industrie, une communication régulière au moyen de téléconférences et de réunions en personne a instauré un sentiment d'appartenance collective, et les résultats de recherche ont ainsi pu être appliqués plus stratégiquement que si les étudiants et universitaires avaient travaillé chacun de leur côté. Le projet AWARE a tenu quatre assemblées générales annuelles, dont chacune a rassemblé les étudiants, membres du corps enseignant, chercheurs et gestionnaires du gouvernement et représentants de l'industrie. Les assemblées se sont déroulées dans différents endroits, souvent axés sur les sites principaux, offrant la possibilité à tous les participants d'apprendre directement les besoins en matière de recherche de l'industrie ainsi que de connaître les conditions forestières uniques. AWARE est par conséquent venu à l'appui d'un grand nombre de thèses de maîtrise et de doctorat, dont un petit nombre demeure en élaboration, et d'un grand nombre de rapports de recherche évalués par les pairs (Tableau 3), et bien d'autres comptes rendus de conférences et présentations par affiches. De plus, en investissant dans des groupes de recherche dans les sept universités, bien d'autres étudiants invités étrangers, universitaires et étudiants de premier cycle ont travaillé avec les étudiants et chercheurs d'AWARE et ont tiré profit des ensembles de données du projet et des approches élaborées. Une série de conférences en ligne donnant un aperçu des résultats clés de la recherche menée par les chercheurs d'AWARE a également été organisée par l'IFC (Tableau 2). En encourageant la collaboration dans tout le milieu, AWARE a contribué à d'autres possibilités de recherche qui ont profité directement aux intervenants. En particulier, la participation d'experts en inventaire forestier au sein des gouvernements provinciaux a favorisé l'examen des questions de recherche d'intérêt commun.

Pour terminer, en encourageant les étudiants à travailler étroitement avec les chercheurs de l'industrie et du gouvernement, des possibilités d'emploi et de réseautage pour l'avenir se sont présentées, et plusieurs diplômés du projet AWARE sont maintenant employés par des partenaires industriels ou gouvernementaux du projet ou continuent de collaborer avec eux.

Défis de mise en œuvre

Si la plupart des initiatives de collaboration ont été considérées comme constructives pendant toute la durée d'AWARE, un certain nombre d'attentes n'ont pas été entièrement comblées.

Adoption par l'industrie

Il y a eu de nombreux exemples de projets de recherche d'étudiants qui s'harmonisaient avec les besoins de l'industrie exposés par l'entreprise tout au long du projet. Cependant, dans certains cas, les projets proposés ne s'alignaient pas explicitement sur les besoins en matière de recherche de l'industrie ou les besoins en recherche ont évolué au cours des cinq années du projet, et les résultats ont ainsi été moins pertinents que ce qui avait été espéré. Une multitude de raisons peuvent être invoquées. Un défi important était celui de répondre aux attentes de l'industrie qui souhaite des réponses rapides et concrètes et aux exigences des établissements universitaires à la recherche de progrès scientifiques notables et de nouvelles connaissances. Dans bien des cas, surmonter ce défi réclamait davantage que d'acquiescer une compréhension commune de la réalité de chacun. Cela nécessite une gestion claire des attentes des deux parties pour assurer des résultats de recherche opportuns, tout en permettant l'élaboration de projets individuels et le développement intellectuel par l'étudiant. Souvent, un résultat de recherche pour un étudiant ou un universitaire consiste en un article évalué par les pairs; pour l'industrie ou le gouvernement, il s'agit plutôt d'un outil ou un produit prêt pour une application opérationnelle. Le temps et les ressources nécessaires pour combler l'écart peuvent être considérables. Nous reconnaissons que l'adoption par l'industrie aurait pu être grandement favorisée par la participation d'entreprises et de consultants de transfert de technologies dans des partenariats de recherche de telle envergure, souvent rompus dans l'application opérationnelle des résultats de recherche. Nous reconnaissons qu'il y a pu avoir un chaînon manquant dans le projet AWARE à cet égard.

Évolution des priorités

En ce qui a trait au point précédent, il y a la question de l'adaptation à l'évolution rapide des priorités dans l'industrie forestière. Les besoins en recherche au sein de l'industrie sont souvent dictés par un ensemble de besoins à court terme du marché ainsi que des missions de recherche et développement à plus long terme. Parfois, les projets définis au commencement d'AWARE ne cadraient plus avec les besoins de l'industrie une fois les cinq ans du projet écoulés. Par conséquent, les résultats de recherche des étudiants peuvent ne pas avoir satisfait directement les besoins de l'industrie à l'achèvement. Une recommandation clé d'AWARE lorsque de gros projets à volets multiples entre plusieurs universités sont élaborés est d'encourager une flexibilité dans la conception pour permettre aux objectifs du projet d'évoluer pendant la durée de vie du projet ou pour permettre la définition de questions nouvelles ou émergentes.

État de préparation opérationnelle

Les partenaires industriels, dans bien des cas, s'attendent à ce que les résultats de recherche orientent directement le processus décisionnel de la gestion et des opérations et, de préférence, alimentent directement les réalités opérationnelles. Pour ce, les approches et méthodologies de recherche doivent être mises à l'essai et validées. Si un logiciel est développé, il doit être bien documenté, robuste et prêt à être mis en œuvre. Au cours de la dernière décennie au Canada, nous avons observé la création d'un certain nombre de sources de finan-

cement centrées sur des stages comme MITACS, qui se font le complément du financement axé sur la recherche plus traditionnel du CRSNG basé sur des subventions. Lorsque de nouveaux partenariats de recherche sont établis, les stages pourraient être conçus expressément pour produire des résultats de recherche se rapportant plus directement aux entreprises, ce qui permettrait ensuite aux étudiants à la fin de leur programme de travailler aussitôt avec l'industrie pour assurer la mise en œuvre des résultats. Au bout du compte, nous croyons que le personnel hautement qualifié formé dans le cadre du projet AWARE et ultérieurement employé par l'industrie, les gouvernements et les universités agira comme le meilleur catalyseur d'innovation dans la télédétection forestière canadienne au cours de la prochaine décennie.

Recommandations

- Dans un domaine technologique comme la télédétection, cinq années sont une longue période. De nouvelles questions de recherche surgissent avec l'évolution de la technologie. Une marge de manœuvre est donc requise relativement à la conception du projet afin de définir de nouvelles questions et de mobiliser de nouveaux partenaires. Une telle latitude est importante pour que la recherche demeure pertinente et opportune. Le mécanisme de financement du projet AWARE ne permettait pas nécessairement un tel degré de marge de manœuvre. Voilà pourquoi nous recommandons que la conception de projet prévoie une certaine latitude pour offrir la possibilité d'intégrer de nouvelles questions à mesure que le projet évolue.
- Le transfert de technologies et l'échange des connaissances constituent des éléments fondamentaux pour travailler avec les organismes de réglementation et intervenants de l'industrie et doivent faire partie intégrante des projets individuels, tout comme des grands projets interdisciplinaires dans leur ensemble. Ils nécessitent en outre des efforts considérables, du temps et des ressources. Les publications scientifiques sont des communications essentielles, mais les synthèses non scientifiques sont également très importantes pour collaborer avec des partenaires en dehors du milieu universitaire (p. ex. White *et coll.* 2013 ; White *et coll.* 2017). Du temps et des ressources doivent leur être affectés. Avec un projet comme AWARE qui comporte de nouvelles technologies et approches, les activités de transfert de technologies commencent réellement lorsque le projet est lancé, nommément en collaborant avec les partenaires industriels. Ce transfert de technologies est ensuite un volet qui a cours tout au long du cycle de vie du projet.
- Le partage des données ouvertes prend de plus en plus d'importance pour la recherche scientifique et l'adoption de nouvelles technologies par l'industrie. La mise en place d'un portail de partage des données ouvertes assure une transparence, favorise les investissements dans la collecte des données primaires et permet de travailler avec les partenaires de l'industrie.
- Les contributions des partenaires industriels ont pris la forme de financement ainsi que d'appui non financier. Ce dernier peut être difficile à maintenir pour l'industrie tout au long du cycle de vie de cinq ans d'un projet, les diffé-

rentes entreprises ne disposant pas toutes des mêmes capacités d'engagement. Une plus grande flexibilité dans la définition de la contribution en nature est nécessaire pour permettre à l'industrie de tirer le meilleur parti de sa participation au projet.

Conclusion

Le projet quinquennal AWARE a contribué à d'uniques collaborations entre les universités, l'industrie et le gouvernement. S'il est vrai que des relations de collaboration conventionnellement solides ont été établies entre une équipe de recherche unique et une entreprise individuelle, AWARE était expressément convaincu des avantages combinés de réunir des équipes de chercheurs et des représentants de l'industrie, dans l'espoir que, collectivement, les résultats de recherche seraient meilleurs que si des équipes individuelles avaient produit seules les résultats de recherche. Le projet a permis d'obtenir un ensemble de livrables répondant aux besoins en matière de foresterie de l'échelle de l'arbre individuel à l'échelle nationale tout en offrant d'exceptionnelles occasions de formation pour les étudiants à différents niveaux. Nous sommes donc persuadés que le projet AWARE laissera en héritage des sciences de grande qualité, et toute porte à croire que l'industrie forestière peut cerner des besoins en recherche ciblés et que les gouvernements et universités peuvent collaborer avec l'industrie pour satisfaire ces besoins et ainsi améliorer la compétitivité du secteur forestier canadien avec des résultats améliorés en matière d'information pour appuyer la prise de décisions sur l'aménagement forestier durable.

Remerciements

La présente recherche a été financée par la subvention de recherche et développement coopérative AWARE (Assessment of Wood Attributes using Remote Sensing [évaluation des attributs du bois à l'aide de la télédétection]) du Conseil de recherches en sciences naturelles et en génie du Canada. Du soutien de l'industrie a été reçu de FPInnovations, West Fraser, Corner Brook Pulp and Paper Limited, Ryam Forest Management (anciennement Tembec) et JD Irving Limited. Des contributions supplémentaires ont été obtenues de Columbia Forest Products et de Hearst Forest Management. Un appui non financier important a été fourni par le Centre canadien sur la fibre de bois (CCFB), le Service canadien des forêts, l'Institut de recherche sur les feuillus nordiques et les ministères provinciaux des Forêts. Les universités qui ont participé au projet AWARE étaient l'Université de la Colombie-Britannique, l'Université Laval, l'Université du Nouveau-Brunswick, l'Université de Sherbrooke, l'Université Queen's, l'Université du Québec à Montréal, l'Université de Toronto, l'Université Nipissing et l'Université Laval.

En plus du solide appui de toutes ces organisations, l'équipe de recherche AWARE souligne en particulier le soutien essentiel de Doug Pitt, George Bruemmer, Denis Ouellet et Denis Cormier qui ont joué un rôle déterminant dès le début et ont déployé sans relâche des efforts afin d'obtenir un appui pour le projet AWARE au CCFB et à FPInnovations. Deux évaluateurs internationaux (M. Ross Nelson, NASA [retraité] et M. Sorin Popescu [Université A&M du Texas]) ont assisté à toutes les assemblées générales annuelles et ont fourni d'indispensables commentaires sur la recherche et le

projet AWARE. Nous les remercions de leur soutien inlassable et de leur enthousiasme à l'égard d'AWARE. Nous remercions l'équipe de recherche à l'Université du Québec à Montréal pour l'opérationnalisation du programme SEGMA. Nous reconnaissons également le soutien logistique et organisationnel essentiel [et l'énorme enthousiasme pour le projet et ses étudiants] des administrateurs de programme AWARE Curtis Marr et Gladys Tecson. Il aurait été impossible de réaliser ce projet sans vous.

Références

- Bolton, D.K., N.C. Coops, T. Hermosilla, M.A. Wulder and J. C. White. 2018. Evidence of vegetation greening at alpine treeline ecotones: Three decades of Landsat spectral trends informed by LiDAR-derived vertical structure. *Environ. Res. Lett.* 13(8): 084022. doi:10.1088/1748-9326/aad5d2.
- Bolton, D.K., P. Tompalski, N.C. Coops, J.C. White, M.A. Wulder, T. Hermosilla, M. Queinnec, J.E. Luther, O.R. van Lier, R.A. Fournier, M. Woods, P.M. Treitz, K.Y. van Ewijk, G. Graham and L. Quist. 2020. Optimizing Landsat time series length for regional mapping of LiDAR-derived forest structure. *Remote Sens. Environ.* 239: 111645. doi:10.1016/j.rse.2020.111645.
- Briggs, D. 2010. Enhancing forest value productivity through fiber quality. *J. For.* 108(4): 174–182. doi:10.1093/jof/108.4.174.
- Budei, B.C. and B. St-Onge. 2018. Variability of multispectral LiDAR 3D and intensity features with individual tree height and its Influence on needleleaf tree species identification. *Can. J. Remote Sens.* 44(4): 263–286. doi:10.1080/07038992.2018.1478724.
- Budei, B.C., B. St-Onge, C. Hopkinson and F.A. Audet. 2018. Identifying the genus or species of individual trees using a three-wavelength airborne lidar system. *Remote Sens. Environ.* 204: 632–647. doi:10.1016/j.rse.2017.09.037.
- Cao, L., N.C. Coops, J.L. Innes, S.R.J. Sheppard, L. Fu, H. Ruan and G. She. 2016. Estimation of forest biomass dynamics in subtropical forests using multi-temporal airborne LiDAR data. *Remote Sens. Environ.* 178: 158–171. doi:10.1016/j.rse.2016.03.012.
- Chen, Q., D. Baldocchi, P. Gong and M. Kelly. 2006. Isolating individual trees in a savanna woodland using small footprint LiDAR data. *Photogram. Eng. Rem. Sens.* 72(8): 923–932.
- Coops, N.C. and M.A. Wulder. 2019. Breaking the habit(at). *Trends Ecol. Evol.* 34(7): 585–587. doi:10.1016/j.tree.2019.04.013.
- Coops, N.C. P. Tompalski, T.R.H. Goodbody, M. Queinnec, J.E. Luther, D.K. Bolton, J.C. White, M.A. Wulder, O.R. van Lier, T. Hermosilla 2021. Extrapolating LiDAR-derived estimates of forest attributes over space and time: A review of approaches and future trends. *Rem. Sens. Environ.* (in review).
- Côté, J.-F., R.A. Fournier, J.E. Luther and O.R. van Lier. 2018. Fine-scale three-dimensional modeling of boreal forest plots to improve forest characterization with remote sensing. *Remote Sens. Environ.* 219: 99–114. doi:10.1016/j.rse.2018.09.026.
- Côté, J.-F., J.E. Luther, P. Lenz, R.A. Fournier and O.R. van Lier. 2020. Assessing the impact of fine-scale structure on predicting wood fibre attributes of boreal conifer trees and forest plots. *Forest Ecol. Manage.* 479: 118624. doi:10.1016/j.foreco.2020.118624.
- Crespo-Peremarch, P., R.A. Fournier, V.-T. Nguyen, L.A. Ruiz and O.R. van Lier. 2020. Comparative detection of the vertical distribution of forest components with full-waveform, discrete airborne and discrete terrestrial laser scanning data. *Forest Ecol. Manage.* 473: 118268. doi:10.1016/j.foreco.2020.118268.
- Degnan, J.J. 2002. Photon-counting multikilohertz microlaser altimeters for airborne and spaceborne topographic measurements. *J. Geodyn.* 34(3-4): 503–549. doi:10.1016/S0264-3707(02)00045-5.
- Donovan, S.D., D.A. MacLean, J.A. Kershaw and M.B. Lavigne. 2018. Quantification of forest canopy changes caused by spruce budworm defoliation using digital hemispherical imagery. *Agric. For. Meteorol.* 262: 89–99. doi:10.1016/j.agrformet.2018.07.006.

- Donovan, S.D., D.A. MacLean, Y. Zhang, M.B. Lavigne and J.A. Kershaw. 2021. Evaluating annual spruce budworm defoliation using change detection of vegetation indices calculated from satellite hyperspectral imagery. *Remote Sens. Environ.* 253: 112204 doi.org/10.1016/j.rse.2020.112204
- Duncanson, L. and R. Dubayah. 2018. Monitoring individual tree-based change with airborne LiDAR. *Ecol. Evol.* 8(10): 5079–5089. doi:10.1002/ece3.4075.
- Fernandez-Diaz, J., W. Carter, C. Glennie, R. Shrestha, Z. Pan, N. Ekhtari, A. Singhania, D. Hauser and M. Sartori. 2016. Capability assessment and performance metrics for the Titan Multispectral Mapping LiDAR. *Remote Sens.* 8(11): 936. doi:10.3390/rs8110936.
- Fridman, J., S. Holm, M. Nilsson, P. Nilsson, A.H. Ringvall and G. Ståhl. 2014. Adapting National Forest Inventories to changing requirements - The case of the Swedish National Forest Inventory at the turn of the 20th century. *Silva Fenn.* 48(3):1–29. doi: 10.14214/sf.1095.
- Frizzle, C. R.A. Fournier, M. Trudel and J.E. Luther. 2021. Using the soil and water assessment tool to develop a LiDAR-based index of the erosion regulation ecosystem service. *J. Hydrol.* 595. doi:10.1016/j.jhydrol.2021.126009.
- Furze, S., M. Castonguay, J. Ogilvie, M. Nasr, P. Cormier, R. Gagnon, G. Adams and P.A. Arp. 2017a. Assessing soil-related black spruce and white spruce plantation productivity. *Open J. For.* 7(02): 209–227. doi:10.4236/ojfor.2017.72013.
- Furze, S., J. Ogilvie and P.A. Arp. 2017b. Fusing digital elevation models to improve hydrological interpretations. *J. Geogr. Inf. Syst.* 9(05): 558–575. doi:10.4236/jgis.2017.95035.
- Genuer, R., J.M. Poggi and C. Tuleau-Malot. 2015. VSURF: An R package for variable selection using random forests. *The R Journal.* 7(2): 19–33. doi:10.32614/rj-2015-018.
- Gillis, M.D. 2001. Canada's National Forest Inventory (Responding to current information needs). *Environ. Monit. Assess.* 67: 121–129 doi:10.1023/A:1006405820244
- Goodbody, T.R.H., N.C. Coops and J.C. White. 2019. Digital aerial photogrammetry for updating area-based forest inventories: A review of opportunities, challenges and future directions. *Curr. For. Reports.* 5: 55–75. doi:10.1007/s40725-019-00087-2.
- Goodbody, T.R.H., N.C. Coops, P. Tompalski, P. Crawford and K.J. Day. 2016. Updating residual stem volume estimates using ALS- and UAV-acquired stereo-photogrammetric point clouds. *Int. J. Remote Sens.* 38(8-10): 2938–2953. doi:10.1080/01431161.2016.1219425.
- Goodbody, T.R.H., N.C. Coops, T. Hermosilla, P. Tompalski, G. McCartney and D.A. Maclean. 2018a. Digital aerial photogrammetry for assessing cumulative spruce budworm defoliation and enhancing forest inventories at a landscape-level. *ISPRS J. Photogramm. Remote Sens.* 142: 1–11. doi:10.1016/j.isprsjprs.2018.05.012.
- Goodbody, T.R.H., N.C. Coops, T. Hermosilla, P. Tompalski and G. Pelletier. 2018b. Vegetation phenology driving error variation in digital aerial photogrammetrically derived Terrain Models. *Remote Sens.* 10(10): 1554. doi:10.3390/rs10101554.
- Goodbody, T.R.H., P. Tompalski, N.C. Coops, C. Hopkinson, P. Treitz and K. van Ewijk. 2020. Forest inventory and diversity attribute modelling using structural and intensity metrics from multi-spectral airborne laser scanning data. *Remote Sens.* 12(13): 2109. doi:10.3390/rs12132109.
- Goodbody, T.R.H., N.C. Coops, J.E. Luther, P. Tompalski, C. Mulverhill, C. Frizzle, R. Fournier, S. Furze and S. Herniman. (2021). Airborne laser scanning for quantifying criteria and indicators of sustainable forest management in Canada. *Can. J. Forest Res.* (in press).
- Guo, X., N.C. Coops, P. Tompalski, S.E. Nielsen, C.W. Bater and J. John Stadt. 2017. Regional mapping of vegetation structure for biodiversity monitoring using airborne LiDAR data. *Ecol. Inform.* 38: 50–61. doi:10.1016/j.ecoinf.2017.01.005.
- Herniman, S., N.C. Coops, K. Martin, P. Thomas, J.E. Luther and O.R. van Lier. 2020. Modelling avian habitat suitability in boreal forest using structural and spectral remote sensing data. *Remote Sens. Appl. Soc. Environ.* 19: 100344. doi:10.1016/j.rsase.2020.100344.
- Huang, S., S. X. Meng and Y. Yang. 2009. A growth and yield projection system (GYPSY) for natural and post-harvest stands in Alberta. [online]. For. Div. Alberta Sustain. Resour. Dev. Tech. Rep. T/216, 1–22. Available from https://open.alberta.ca/dataset/2a58d86b-b011-477e-bbeb-d9a6c67477bd
- Ke, Y. and L.J. Quackenbush. 2011. A review of methods for automatic individual tree-crown detection and delineation from passive remote sensing. *Int. J. Remote Sens.* 32(17): 4725–4747. doi:10.1080/01431161.2010.494184.
- Koch, B., U. Heyder and H. Weinacker. 2006. Detection of individual tree crowns in airborne LiDAR data. *Photo. Eng. Rem. Sens.* 72(4):357–363.
- Lagacherie, P. and A.B. McBratney. 2006. Chapter 1: Spatial Soil Information Systems and Spatial Soil Inference Systems: Perspectives for Digital Soil Mapping. *Dev. Soil Sci.* 31: 3–22. doi:10.1016/S0166-2481(06)31001-X.
- Lamb, S.M., D.A. MacLean, C.R. Hennigar and D.G. Pitt. 2017. Imputing tree lists for New Brunswick spruce plantations through nearest-neighbor matching of airborne laser scan and inventory plot data. *Can. J. Remote Sens.* 43(3): 269–285. doi:10.1080/07038992.2017.1324288.
- Lamb, S.M., D.A. MacLean, C.R. Hennigar and D.G. Pitt. 2018. Forecasting forest inventory using imputed tree lists for LiDAR grid cells and a tree-list growth model. *Forests* 9: 1–18. doi:10.3390/f9040167.
- Li, Q., J. Degnan, T. Barrett and J. Shan. 2016. First evaluation on single photon-sensitive LiDAR data. *Photogramm. Eng. Remote Sens.* 82: 455–463. doi:10.14358/pers.82.7.455.
- Lachenbruch, B., J.R. Moore and R. Evans. 2011. Radial variation in wood structure and function in woody plants, and hypotheses for its occurrence in size- and age-related changes in tree structure and function. Meinzer, F.C., Lachenbruch, B. (Eds.). Springer: New York, NY, USA.
- Leckie, D.G. and M.D. Gillis. 1995. Forest inventory in Canada with emphasis on map production. *For. Chron.* 71(1): 74–88.
- Luther, J.E., R.A. Fournier, O.R. van Lier and M. Bujold. 2019. Extending ALS-based mapping of forest attributes with medium resolution satellite and environmental data. *Remote Sens.* 11(9): 1092. doi:10.3390/rs11091092.
- Magnussen, S., G. Stinson and P. Boudewyn. 2017. Updating Canada's National Forest Inventory with multiple imputations of missing contemporary data. *For. Chron.* 93(03): 241–245. doi: 10.5558/tfc2017-030.
- Marczak, P.T., K.Y. van Ewijk, P.M. Treitz, N.A. Scott and D.C.E. Robinson. 2020. Predicting carbon accumulation in temperate forests of Ontario, Canada using a LiDAR-initialized growth-and-yield model. *Remote Sens.* 12(1): 201. doi:10.3390/rs12010201.
- Mauro, F., M. Ritchie, B. Wing, B. Frank, V. Monleon, H. Temesgen and A. Hudak. 2019. Estimation of changes of forest structural attributes at three different spatial aggregation levels in Northern California using multitemporal LiDAR. *Remote Sens.* 11: 923. doi:10.3390/rs11080923.
- McBratney, A.B., M.L. Mendonça Santos and B. Minasny. 2003. On digital soil mapping. *Geoderma.* 117(1-2): 3–52. doi:10.1016/S0016-7061(03)00223-4.
- McRoberts, R.E., O.M. Bollandsås and E. Næsset. 2014. Modeling and estimating change. *In: Forestry Applications of Airborne Laser Scanning Concepts and Case Studies.* 27: 293–313. doi:10.1007/978-94-017-8663-8_15.
- McRoberts, R.E., E. Næsset, T. Gobakken and O.M. Bollandsås. 2015. Indirect and direct estimation of forest biomass change using forest inventory and airborne laser scanning data. *Remote Sens. Environ.* 164: 36–42. doi:10.1016/j.rse.2015.02.018.

- Mulverhill, C., N.C. Coops, P. Tompalski and C.W. Bater. 2020.** Digital terrestrial photogrammetry to enhance field-based forest inventory across stand conditions. *Can. J. Remote Sens.* 46(5): 622–639. doi:10.1080/07038992.2020.1831376.
- Mulverhill, C., N.C. Coops, P. Tompalski, C.W. Bater and A.R. Dick. 2019a.** The utility of terrestrial photogrammetry for assessment of tree volume and taper in boreal mixedwood forests. *Ann. For. Sci.* 76(2): 83. doi:10.1007/s13595-019-0852-9.
- Mulverhill, C., N.C. Coops, J.C. White, P. Tompalski and P.L. Marshall. 2019b.** Structural development following stand-replacing disturbance in a boreal mixedwood forest. *For. Ecol. Manage.* 453: 117586. doi:10.1016/j.foreco.2019.117586.
- Mulverhill, C., N.C. Coops, J. White, P. Tompalski, P. Marshall and T. Bailey. 2018.** Enhancing the estimation of stem-size distributions for unimodal and bimodal stands in a boreal mixedwood forest with airborne laser scanning data. *Forests* 9(2): 95. doi:10.3390/f9020095.
- Næsset, E. and T. Gobakken. 2005.** Estimating forest growth using canopy metrics derived from airborne laser scanner data. *Remote Sens. Environ.* 96(3–4): 453–465. doi:10.1016/j.rse.2005.04.001.
- Noordermeer, L., R. Økseter, H. Ole Ørka, T. Gobakken, E. Næsset and O.M. Bollandsås. 2019.** Classifications of forest change by using bitemporal airborne laser scanner data. *Remote Sens.* 11(18): 2145. doi:10.3390/rs11182145.
- Nuijten, R.J.G., N.C. Coops, T.R.H. Goodbody and G. Pelletier. 2019.** Examining the multi-seasonal consistency of individual tree segmentation on deciduous stands using digital aerial photogrammetry (DAP) and unmanned aerial systems (UAS). *Remote Sens.* 11(7): 739. doi:10.3390/rs11070739.
- Økseter, R., O.M. Bollandsås, T. Gobakken and E. Næsset. 2015.** Modeling and predicting aboveground biomass change in young forests using multi-temporal airborne laser scanner data. *Scand. J. For. Res.* 30(5): 458–469. doi:10.1080/02827581.2015.1024733.
- Perron, R. 2018.** Identification automatisée par lidar aérien de l'espèce d'arbres individuels en forêt boréale aménagée, M.Sc. Thesis, Université du Québec à Montréal, May 2018, 97 p.
- Pokharel, B., J.P. Dech, A. Groot and D. Pitt. 2014.** Ecologically-based predictive modeling of wood quality characteristics of black spruce (*Picea mariana* (Mill.) B.S.P.) in boreal landscapes of Northern Ontario. *Can. For. J. Res.* 44: 465–475.
- Poudel, K.P., J.W. Flewelling and H. Temesgen. 2018.** Predicting volume and biomass change from multi-temporal LiDAR sampling and remeasured field inventory data in Panther Creek Watershed, Oregon, USA. *Forests* 9(1): 28. https://doi.org/10.3390/f9010028.
- Priedhorsky, W.C., R.C. Smith and C. Ho. 1996.** Laser ranging and mapping with a photon-counting detector. *Appl. Opt.* 35(3): 441–452. doi:10.1364/AO.35.000441.
- Queinnec, M., P. Tompalski, D.K. Bolton and N.C. Coops. 2021.** FOSTER – An R package for forest structure extrapolation. *PLOS-1*. 16(1) 10.1371/journal.pone.0244846
- Ravaglia, J., A. Bac and R.A. Fournier. 2017.** Extraction of tubular shapes from dense point clouds and application to tree reconstruction from laser scanned data. *Comput. Graph.* 66, 23–33
- Ravaglia, J., R. Fournier, A. Bac, C. Véga, J.-F. Côté, A. Piboule and U. Rémillard. 2019.** Comparison of Three Algorithms to Estimate Tree Stem Diameter from Terrestrial Laser Scanner Data. *Forests* 10(7): 599. doi:10.3390/f10070599.
- Roussel, J.R., M. Béland, J. Caspersen and A. Achim. 2018.** A mathematical framework to describe the effect of beam incidence angle on metrics derived from airborne LiDAR: The case of forest canopies approaching turbid medium behaviour. *Remote Sens. Environ.* 209: 824–834. doi:10.1016/j.rse.2017.12.006.
- Roussel, J.R., J. Caspersen, M. Béland, S. Thomas and A. Achim. 2017.** Removing bias from LiDAR-based estimates of canopy height: Accounting for the effects of pulse density and footprint size. *Remote Sens. Environ.* 198: 1–16. doi:10.1016/j.rse.2017.05.032.
- Roussel, J., D. Auty, N.C. Coops, P. Tompalski, T.R.H. Goodbody, A.S. Meador, J. Bourdon, F. de Boissieu and A. Achim. 2020.** lidR: An R package for analysis of airborne laser scanning (ALS) data. *Remote Sens. Environ.* 251: 112061. https://doi.org/10.1016/j.rse.2020.112061.
- Schmidt, A., R.A. Fournier, J.E. Luther and M. Trudel. 2020.** Development of a mapping framework for ecosystem services: The case of sediment control supply at a watershed scale in Newfoundland, Canada. *Ecol. Indic.* 117: 105618. doi:10.1016/j.ecolind.2020.106518.
- Schreier, H., J. Lougheed, C. Tucker and D. Leckie. 1985.** Automated measurements of terrain reflection and height variations using an airborne infrared laser system. *Int. J. Rem. Sens.* 6: 101–13
- Solberg, S., H. Kvaalen and S. Puliti. 2019.** Age-independent site index mapping with repeated single-tree airborne laser scanning. *Scand. J. For. Res.* 34(8): 763–770. doi:10.1080/02827581.2019.1616814.
- Swatantran, A., H. Tang, T. Barrett, P. Decola and R. Dubayah. 2016.** Rapid, high-resolution forest structure and terrain mapping over large areas using single photon LiDAR. *Sci. Rep.* 6(1): 28277. doi:10.1038/srep28277.
- Tompalski, P., N.C. Coops, J. White and M. Wulder. 2016.** Enhancing forest growth and yield predictions with airborne laser scanning data: Increasing spatial detail and optimizing yield curve selection through template matching. *Forests* 7(11): 255. doi:10.3390/f7110255.
- Tompalski, P., N.C. Coops, P. Marshall, J. White, M. Wulder and T. Bailey. 2018.** Combining multi-date airborne laser scanning and digital aerial photogrammetric data for forest growth and yield modelling. *Remote Sens.* 10(9): 347. https://doi.org/10.3390/rs10020347.
- Tompalski, P., J. Rakofsky, N.C. Coops, J.C. White, A.N.V. Graham and K. Rosychuk. 2019.** Challenges of Multi-Temporal and Multi-Sensor Forest Growth Analyses in a Highly Disturbed Boreal Mixedwood Forests. *Remote Sens.* 11(18): 2102. doi:10.3390/rs11182102.
- Tompalski, P., Coops, N.C., White, J.C., Goodbody, T.R.H., Hennigar, C.R., Wulder, M.A., Socha, J., Woods, M.E., 2021.** Estimating Changes in Forest Attributes and Enhancing Growth Projections: a Review of Existing Approaches and Future Directions Using Airborne 3D Point Cloud Data. *Current Forestry Reports*. https://doi.org/10.1007/s40725-021-00135-w
- Townshend, E., B. Pokharel, A. Groot, D. Pitt and J. Dech. 2015.** Modeling wood fibre length in black spruce (*Picea mariana* (Mill.) BSP) based on ecological land classification. *Forests* 6: 3369–3394.
- van Ewijk, K., P. Treitz, M. Woods, T. Jones and J. Caspersen. 2019.** Forest site and type variability in ALS-based forest resource inventory attribute predictions over three Ontario forest sites. *Forests* 10(3): 226. doi:10.3390/f10030226.
- van Ewijk, K., P. Tompalski, P. Treitz, N.C. Coops, M. Woods (ret.) and D. Pitt (ret.). 2020.** Transferability of ALS-derived forest resource inventory attributes between an eastern and western Canadian boreal forest mixedwood site. *Can. J. Remote Sens.* 46(1): 1–23. doi:10.1080/07038992.2020.1769470.
- van Lier, O.R., J.E. Luther, J.C. White, R.A. Fournier and J.-F. Côté. 2021.** Effect of scan angle on ALS metrics and area-based predictions of forest attributes for balsam fir dominated stands. *Forestry: An International Journal of Forest Research. (in review)*
- Vastaranta, M., V. Kankar, M. Holopainen, X. Yu, J. Hyyppä and H. Hyyppä. 2012.** Combination of individual tree detection and area-based approach in imputation of forest variables using airborne laser data. *ISPR J. Photogram. Remote Sens.* 67: 73–79.
- Wang, Y., J. Hyyppä, X. Liang, H. Kaartinen, X. Yu, E. Lindberg, J. Holmgren, Y. Qin, C. Mallet, A. Ferraz, H. Torabzadeh, F. Morsdorf, L. Zhu, J. Liu and P. Alho. 2016.** International bench-

- marking of the individual tree detection methods for modeling 3-D canopy structure for silviculture and forest ecology using airborne laser scanning. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* 54(9): 5011–5027. <https://doi.org/10.1109/TGRS.2016.2543225>
- White, B., J. Ogilvie, D.M.H. Campbell, D. Hiltz, B. Gauthier, H.K.H. Chisholm, H.K. Wen, P.N.C. Murphy and P.A. Arp. 2012.** Using the cartographic depth-to-water index to locate small streams and associated wet areas across landscapes. *Can. Water Resour. J.* 37(4): 333–347.
- White, J.C., H. Chen, M.E. Woods, B. Low and S. Nasonova. 2019.** The Petawawa Research Forest: Establishment of a remote sensing supersite. *For. Chron.* 95(03): 149–156. doi: 10.5558/tfc2019-024.
- White, J.C., N.C. Coops, M.A. Wulder, M. Vastaranta, T. Hilker and P. Tompalski. 2016.** Remote sensing technologies for enhancing forest inventories: A review. *Can. J. Remote Sens.* 42(5): 619–641. doi:10.1080/07038992.2016.1207484. doi:10.4296/cwrj2011-909.
- White, J.C. M.A. Wulder, A. Varhola, M. Vastaranta, N.C. Coops, B.D Cook, D. Pitt and M.A Woods. 2013.** A best practices guide for generating forest inventory attributes from airborne laser scanning data using an area-based approach. Natural Resources Canada, Canadian Forest Service, Canadian Wood Fibre Centre, Victoria, BC. Information Report FI-X-010.
- White, J.C., P. Tompalski, M. Vastaranta, M.A. Wulder, N. Saarinen, C. Stepper and N.C. Coop. 2017.** A model development and application guide for generating an enhanced forest inventory using airborne laser scanning data and an area-based approach. Victoria, BC, Canada. CWFC Information Report FI-X-018, 38 pp.
- Wulder, M.A., N.C. Coops, A.T. Hudak, F. Morsdorf, R. Nelson, G. Newnham and M. Vastaranta. 2013.** Status and prospects for LiDAR remote sensing of forested ecosystems. *Can. J. Remote Sens.* 39(sup1): S1–S5. doi:10.5589/m13-051.
- Wylie, R.R.M., M.E. Woods and J.P. Dech. 2019.** Estimating stand age from airborne laser scanning data to improve models of black spruce wood density in the boreal forest of Ontario. *Remote Sens.* 11(17): 2022. doi:10.3390/rs11172022.
- Yan, W.Y. and A. Shaker. 2017.** Correction of overlapping multispectral lidar intensity data: Polynomial approximation of range and angle effects. *In: International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences - ISPRS Archives.* XLII-3/W1: 177–182. doi:10.5194/isprs-archives-XLII-3-W1-177-2017.
- Yan, W.Y., K. van Ewijk, P. Treitz and A. Shaker. 2020.** Effects of radiometric correction on cover type and spatial resolution for modeling plot level forest attributes using multispectral airborne LiDAR data. *ISPRS J. Photogramm. Remote Sens.* 169: 152–165. doi:10.1016/j.isprsjprs.2020.09.001.
- Yancho, J.M.M., N.C. Coops, P. Tompalski, T.R.H. Goodbody and A. Plowright. 2019.** Fine-scale spatial and spectral clustering of UAV-acquired digital aerial photogrammetric (DAP) point clouds for individual tree crown detection and segmentation. *IEEE J. Sel. Top. Appl. Earth Obs. Remote Sens.* 12(10): 1–18. doi:10.1109/JSTARS.2019.2942811.
- Yu, X., J. Hyypä, M. Vastaranta, M. Holopainen and R. Viitala. 2011.** Predicting individual tree attributes from airborne laser point clouds based on the random forests technique. *ISPRS J. Photogramm.* 66(1): 28–37. doi: 10.1016/j.isprsjprs.2010.08.00
- Zhao, K., J.C. Suarez, M. Garcia, T. Hu, C. Wang and A. Londo. 2017.** Utility of multitemporal LiDAR for forest and carbon monitoring: Tree growth, biomass dynamics and carbon flux. *Remote Sens. Environ.* 204:883–897. doi:10.1016/j.rse.2017.09.007.