

Rapport final

GEO-INTERPRÉTATION D'UN RÉSEAU ROUTIER FORESTIER ET DE SES
ATTRIBUTS DANS LE BUT AUGMENTER LA PRÉCISION DES LITS
D'ÉCOULEMENTS POTENTIELS

Par :

Université Laval

Naïm Perreault, M.Sc.

Francis Lessard, M.Sc.

Sylvain Jutras, ing.f, Ph.D



Version I, 14 juin 2021

Table des matières

1. Mise en contexte	2
2. But et objectifs.....	3
3. Territoire à l'étude.....	4
4. Méthodologie	5
4.1 Vectorisation des chemins	5
4.2 Vectorisation des ponceaux	8
4.3 Vectorisation de largeur de la chaussée et de l'emprise du chemin	10
4.4 Création des réseaux hydrographiques d'analyse	15
5. Résultats et discussion.....	19
5.1 Évaluation des ressources nécessaires	19
5.2 Résultats de la géo-interprétation	20
5.3 Analyses de comparaison des réseaux.....	24
6. Extraction automatisée du réseau routier forestier et de ses attributs	26
7. Opportunités de recherche et de développement	32
8. Conclusion	33
9. Remerciements.....	33
Références	34

1. Mise en contexte

Selon la base de données d'Adresses Québec, près de 460 000 km de chemins forestiers connus sont présents sur l'ensemble du territoire québécois. Les conclusions du mémoire de maîtrise de Philippe Paradis-Lacombe (Paradis Lacombe, 2018) démontrent qu'une grande majorité des chemins forestiers québécois sont peu fréquentés et par le fait même, non entretenus. De plus, les bases de données géospatiales actuelles sont incomplètes et ne permettent pas de localiser précisément les chemins forestiers. Par exemple, certains chemins forestiers sont présents dans le 3^e programme d'inventaire écoforestier, mais absent du 4^e programme.

Grâce aux modèles numériques de terrain (MNT) dérivés de données LiDAR possédant une résolution de 1 m, il est désormais possible d'identifier visuellement la mise en forme des chemins sous le couvert forestier. Il est alors possible de confirmer le constat de Philippe Paradis-Lacombe que de nombreux chemins forestiers sont absent de toutes bases de données routières existantes. De plus, c'est grâce à la visualisation de modèles ombragés dérivés de MNT LiDAR qu'il est possible d'affirmer que le positionnement des chemins apparaissant dans ces bases de données est imprécis.

Dans le contexte actuel, il est alors très difficile d'effectuer une gestion efficace de la voirie forestière et de réduire les effets néfastes de la dégradation des chemins et des ponceaux. Les effets néfastes d'une dégradation du réseau routier impactent principalement le réseau hydrique étant en contact avec les chemins via les ponceaux. La réduction de ces effets néfastes passe notamment par une cartographie plus précise des milieux humides et hydriques du territoire.

Depuis 2017, le laboratoire d'hydrologie forestière de l'Université Laval développe des méthodes de détection automatisées des composantes hydrographiques à partir de MNT dérivé du LiDAR, telles que les cours d'eau et les petits milieux humides isolés ou riverains, en mettant l'emphase sur une approche de validation basée sur des données terrain. Les outils automatisés ont été développés dans le cadre de plusieurs projets avec le Ministère des Forêts de la Faune et des Parc (MFFP) et le Ministère de l'Environnement de la Lutte contre les changements climatiques (MELCC).

Les algorithmes utilisés pour générer les lits d'écoulements potentiels (LEP) se basent sur un principe d'écoulement de surface. Une des principales difficultés associées à cette approche permettant la détection automatisée des composantes hydrographiques est la présence des obstacles anthropiques tels que les chemins. En effet, les MNT dérivés du LiDAR qui sont utilisés possèdent une résolution suffisamment élevée pour que la mise en forme des chemins soit détectée. Cependant, les ponceaux qui permettent de faire

passer l'eau sous la mise en forme ne sont pas détectés. Ainsi, les LEP générés avec de tels MNT sont souvent déviés le long des chemins et donc fortement erronés lorsque les ponceaux ne sont pas considérés (Lessard, 2020). En plus des LEP, les milieux humides modélisés peuvent également présenter d'importantes aberrations lorsque les ponceaux d'un territoire ne sont pas connus ou mal positionnés. Il est donc essentiel pour l'obtention d'une cartographie précise des composantes hydrographiques de connaître la position exacte des ponceaux sur l'ensemble du territoire. De plus, en connaissant la position exacte des chemins, différentes méthodes de détection des cours d'eau peuvent être comparées. Une méthode permettant de modéliser l'écoulement naturel de l'eau sans l'influence des chemins et nécessitant le positionnement exact de ces derniers a été testée.

Les données présentées dans ce rapport sont disponibles pour une visualisation grâce à la carte interactive suivante :

<https://ulaval.maps.arcgis.com/apps/webappviewer/index.html?id=1adcb3b93bb040718de116df51817243>.

2. But et objectifs

Le but de ce rapport est, dans un premier temps, d'évaluer l'efficacité de l'utilisation de la géo-interprétation du réseau routier forestier et de ses attributs pour la création d'une base de données complète de la voirie forestière et, dans un deuxième temps, de comparer différents réseaux hydrologiques générés grâce aux données créées par géo-interprétation sur le territoire de la forêt Montmorency. Les attributs du réseau routier forestier consistent en les centrelinies de la surface de roulement, les ponceaux ainsi que les largeurs d'emprises et de chaussées des chemins.

3. Territoire à l'étude

Les secteurs A et B de la forêt Montmorency constituent la zone centrale du territoire à l'étude et occupent une superficie de 410 km². Le territoire géo-interprété correspond toutefois à un territoire plus grand (676 km²) afin d'assurer une géo-interprétation complète du réseau routier forestier et de ses attributs (Figure 1). Il est à noter que des portions des bassins versants des rivières Montmorency, Jacques-Cartier, Sainte-Anne et Malbaie adjacentes au territoire de la forêt Montmorency ont été considérées comme territoire à l'étude pour la modélisation des LEP (1 957 km²).

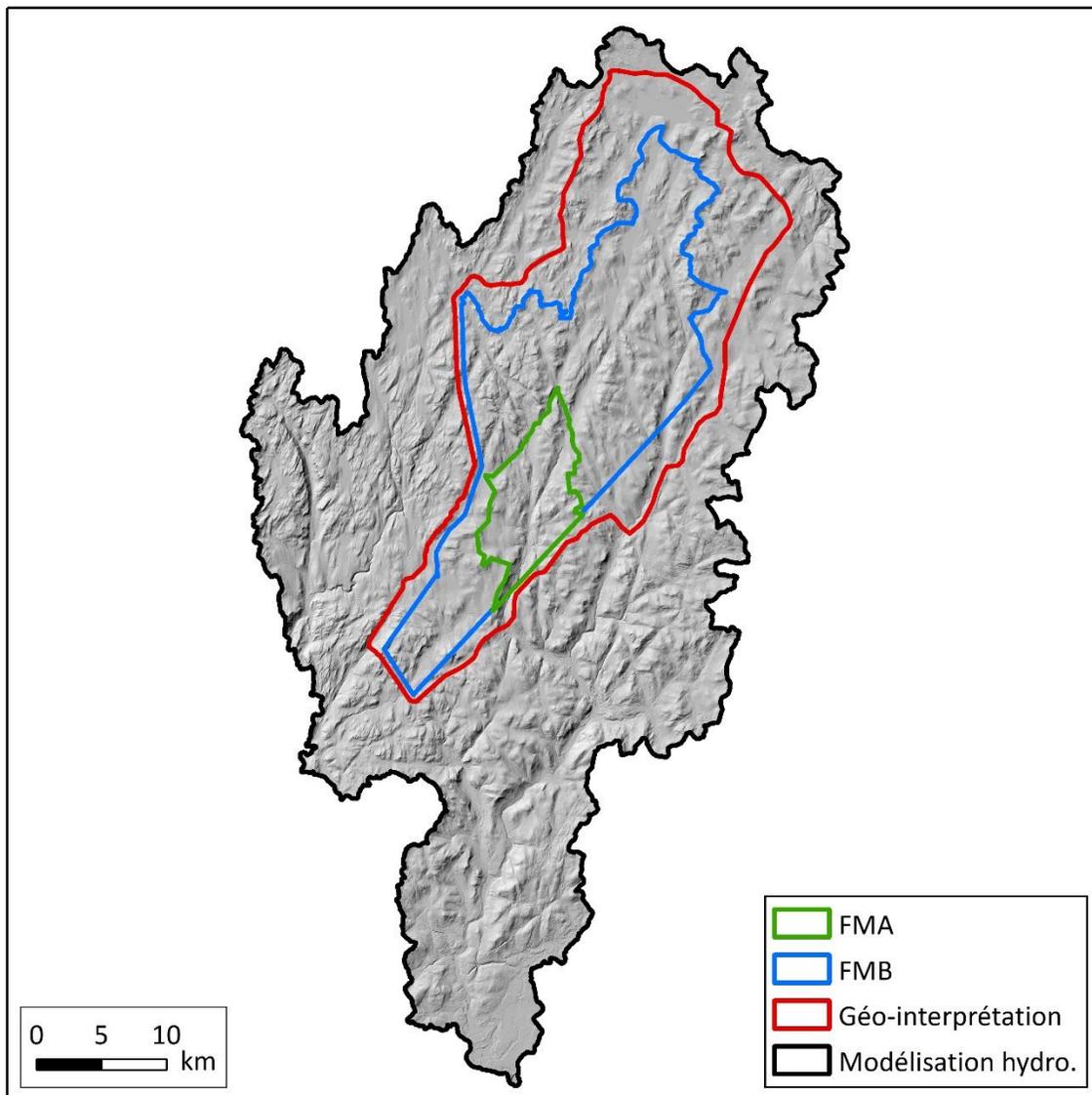


Figure 1 : Territoire à l'étude du projet

4. Méthodologie

La vectorisation du réseau routier et de ses attributs a été réalisée pour l'ensemble du territoire décrit à la section 3. Par exemple, lorsqu'un chemin sortait du territoire de la forêt Montmorency pour y entrer à nouveau plus loin, ce dernier était totalement inclus dans le territoire de géo-interprétation. Afin de travailler de façon méthodique et de s'assurer de couvrir l'ensemble du territoire, un quadrillage de 2 km par 2 km a préalablement été généré. La dimension des cases du quadrillage a été déterminée en fonction de la longueur moyenne des tronçons de chemins entre les intersections pour faciliter la cohérence du travail. Puisque c'est le MNT ombré généré à partir des données LiDAR de 2016 qui a été principalement utilisé comme référence visuelle, la temporalité de la géo-interprétation correspond à cette date d'acquisition.

4.1 Vectorisation des chemins

Les chemins ont été vectorisés sur leurs centrelignes le plus précisément possible. Un exemple du travail effectué est présenté à la figure 2. Pour les intersections et les virées (section de chemin plus large permettant aux véhicules de faire demi-tour), le vecteur représentant le centreligne du chemin a été centré sur la surface de roulement.

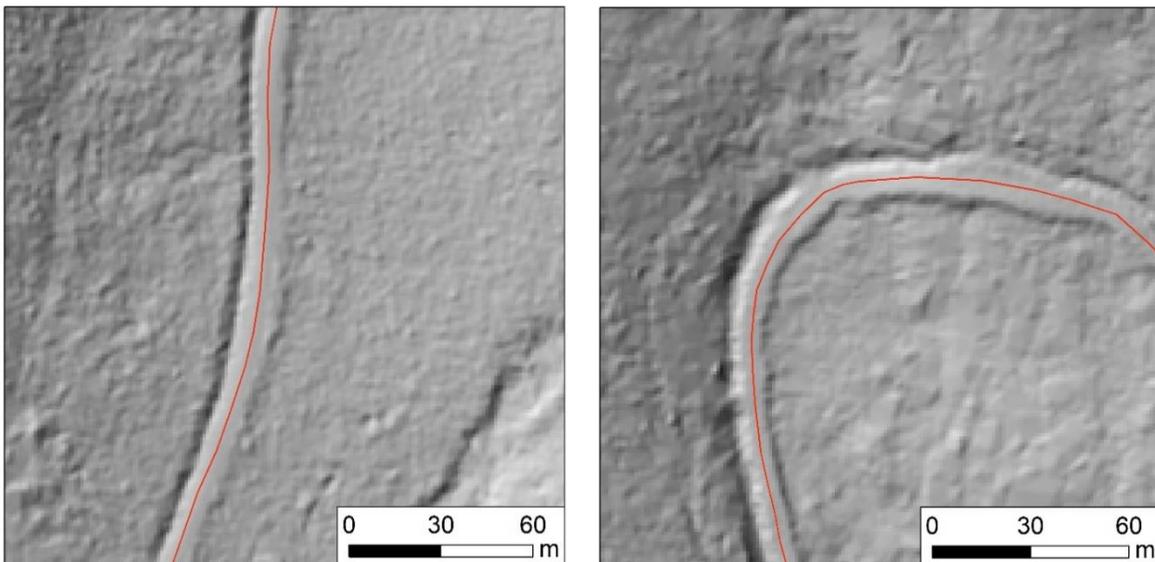


Figure 2 : Exemple de chemin vectorisé sur le centreligne de la mise en forme visible sur le MNT ombré LiDAR

Les données de base permettant de diriger le travail provenaient des bases de données cartographiques des chemins des 3^e et 4^e inventaires écoforestiers réalisés par le MRNF. L'identifiant unique appartenant aux 3^e et 4^e inventaires du MRNF a été noté pour les tronçons existants. Les chemins visibles sur la mise en forme du MNT, mais absents des bases de données de référence ont également être vectorisés. Il est à noter que les chemins dont la mise en forme n'était pas visible sur le MNT ombré n'ont pas été vectorisés. Le tableau 1 résume les informations enregistrées lors de la géo-interprétation des chemins forestiers.

Tableau 1 : Formulaire de géo-interprétation des chemins « Chemins »

Champs	Informations	Commentaires
OBSERV	*Text-50	Observateur
DATE	*Date	Aujourd'hui; cliquer sur le calendrier
CERTITUDE	Certain	Degré de certitude
	Incertain – Résolution photo aérienne	
	Incertain – LiDAR MNT ombré	
	Incertain – Végétation (MHC et imagerie)	
SOURCE_OBSERV1 SOURCE_OBSERV2 SOURCE_OBSERV3 SOURCE_OBSERV4	Photo aérienne	Sources d'observation disponibles et utilisées (1 à 4)
	MNT ombré	
	MHC	
	Écoulements LiDAR	
	GRHQ	
	Base de données existante	
	Terrain	
AN_SOURCE1 AN_SOURCE2 AN_SOURCE3 AN_SOURCE4	*Text-50	Année de la source d'observation (1 à 4)
COMMENT	*Text-500	Commentaires sur le point d'observation
VALID_T	Oui	Validation terrain requise
	Non	
CHEMIN_NOM	*Text-500	Nom du chemin
ETAT	Bon	État du chemin
	Acceptable	
	Médiocre	
	Critique	
	Inconnu	
AN_CONST	*Text-500	Année de construction (ex : 2010-07-15, 2010-07, 2010, 201X)
REVEG	*Text-500	Chemin revégétalisé
AN_REVEG	*Text-500	Année de revégétalisation (ex : 2010-07-15, 2010-07, 2010, 201X)
NO_CHEM	*Text-500	Numéro de chemin
CL_CHEM1	Hors norme	Classe de chemin 1
	Classe 1	
	Classe 2	
	Classe 3	
	Classe 4	
	Classe 5	
	Hiver	
	Inconnu	
	Sentier (VTT, vélo, ski)	
CL_CHEM2	Chemin carrossable non pavé	Classe de chemin 2
	Chemin non carrossable	
NOG_MRNF3	*Entier long	Identifiant unique du 3 ^e inventaire du MRNF
OBJECTID_MRNF4	* Entier long	Identifiant unique du 4 ^e inventaire du MRNF

4.2 Vectorisation des ponceaux

Parallèlement à la vectorisation des chemins, les ponceaux ont été géo-interprétés et positionnés à l'aide d'entités linéaires. Le sens de numérisation était de l'entrée vers la sortie de ceux-ci et les segments sont minimalement aussi longs que la longueur du ponceau. Idéalement, il s'agit du point le plus bas dans le lit du cours d'eau en amont au point le plus bas dans le lit du cours d'eau en aval. Tout d'abord, les ponceaux déjà répertoriés dans les différentes bases de données disponibles, essentiellement sous la forme d'entités ponctuelles, ont tous été ajoutés à la base de données en prenant soin de faire suivre toutes les informations présentes dans le formulaire « Ponceaux » (tableau 2). Dans les cas où le positionnement de ces ponceaux était imprécis, ils ont été repositionnés afin de correspondre aux entités cartographiques visibles (cours d'eau, chemins, etc.) sur le MNT dérivé du LiDAR. La structure non exhaustive et non uniforme des sources de positionnement de ponceaux géoréférencées sur le terrain a inévitablement résulté en une base de données extrêmement variable quant à la densité spatiale de ponceaux présents dans la base de données. La densité réelle des ponceaux est donc nécessairement sous-estimée si seulement ces sources de données terrain sont utilisées.

Ainsi, aux emplacements où aucune information préalable de géo-positionnement de ponceau n'est disponible, mais que la présence de ponceaux est évidente, tel qu'à la jonction d'un cours d'eau permanent et d'un chemin, la vectorisation de ces derniers a été réalisée. Pour chacun des ponceaux nouvellement géo-interprété, seulement les cinq premières informations du formulaire « Ponceaux » (tableau 2) ont été remplies (OBSERV, DATE, CERTITUDE_TRAVERSE, SOURCE_OBSERV# et AN_SOURCE#). Pour chacun de ces ponceaux géo-interprétés, un degré de certitude a été déterminé lors de la vectorisation quant à sa présence réelle. Pour l'instant, tous les ponceaux ont la classe de certitude « Certain ». Une révision sera donc nécessaire, car certains ponceaux devraient plutôt avoir la classe de certitude « Incertain ». Les sources d'information ayant permis de détecter le ponceau ont été notées. La plupart du temps, il s'agit du MNT ombré ainsi que les LEP.

Tableau 2 : Formulaire de géo-interprétation des ponceaux « Ponceaux »

Champs	Informations	Commentaires
OBSERV	*Text-50	Observateur
DATE	*Date	Aujourd'hui; cliquer sur le calendrier
CERTITUDE_TRAVERSE	Certain	Degré de certitude
	Incertain – Résolution photo aérienne	
	Incertain – LiDAR MNT ombré	

	Incertain – Végétation (MHC et imagerie)	
	Incertain – Écoulement LiDAR	
	Incertain – Écoulement GRHQ	
SOURCE_OBSERV1 SOURCE_OBSERV2 SOURCE_OBSERV3 SOURCE_OBSERV4	Photo aérienne MNT ombré MHC Écoulement LiDAR GRHQ BD existante Terrain	Sources d'observation disponibles et utilisées (1 à 4)
AN_SOURCE1 AN_SOURCE2 AN_SOURCE3 AN_SOURCE4	*Text-50	Année de la source d'observation (1 à 4)
COMMENT	*Text-500	Commentaires sur le point d'observation
VALID_T	Oui Non	Validation terrain requise
TYPE_ECOUL	Point d'initiation Drainage naturel Point d'intermittence Intermittent Point de permanence Permanent Drainage anthropique	Type d'écoulement
TYPE_TRAVERSE	Pont Drainage Traverse manquante transversale Traverse manquante longitudinale Traverse de cours d'eau Inconnu	Type de traverse
MATERIAUX_TRAVERSE	Plastique TTOG Métal Bois Béton Inconnu	Matériaux de la traverse
ETAT_TRAVERSE	Bon Acceptable Médiocre Critique Inconnu	État de la traverse
CONFORMITE	Conforme au RADF Non conforme au RADF	Conformité de la traverse
DIAMETRE	*Double	Diamètre de la traverse (mm)
REMBLAI_AMONT	*Double	Hauteur du remblai en amont de la pente (m)
REMBLAI_AVAL	*Double	Hauteur du remblai en aval de la pente (m)

4.3 Vectorisation de largeur de la chaussée et de l'emprise du chemin

Suite à la vectorisation du réseau routier, la largeur de la chaussée ainsi que la largeur de l'emprise ont été vectorisées manuellement. La chaussée correspond à surface de roulement du chemin en tenant compte de la mise en forme du chemin tandis que l'emprise correspond à la surface occupée par l'ouvrage, incluant la zone de déboisement. C'est donc le MNT ombré qui a généralement permis de déterminer la largeur de la chaussée tandis que le MHC a plutôt permis de déterminer la largeur de l'emprise du chemin. D'autres sources d'informations comme des photographies aériennes ont également pu être utilisées pour aider au travail de géo-interprétation. Ces mesures ont été extraites de façon systématique à un intervalle régulier de 250 m. Pour ce faire, une classe d'entité temporaire nommée « Guide_largeur_chemin » contenant des segments d'une longueur de 100 mètres et orientés perpendiculairement aux chemins a été générée automatiquement. Ces segments ont permis d'établir l'angle de vectorisation désirée afin de mesurer le plus précisément possible les largeurs de chaussée et d'emprise. C'est en utilisant les formulaires « Chaussées » et « Emprises » que de nouvelles lignes ont été vectorisées en les superposant aux lignes de la classe d'entité « Guide_largeur_chemin ». Les figures 3 et 4 présentent quelques exemples de segments vectorisés afin de mesurer la largeur de la chaussée et de l'emprise à un endroit précis. Les données collectées sont présentées au tableau 3.

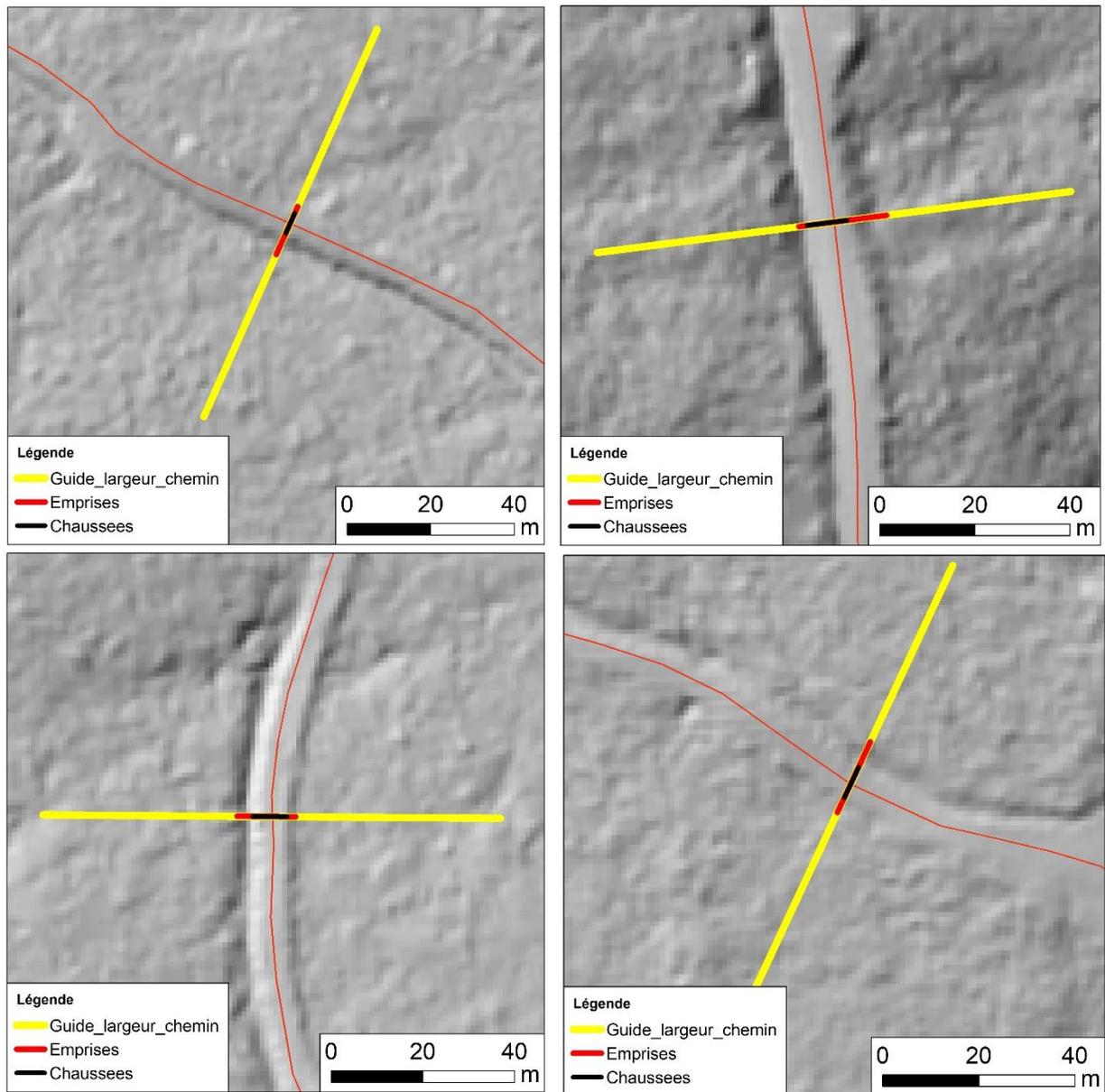


Figure 3 : Vectorisation de la largeur de la chaussée du chemin en se basant sur le MNT ombré

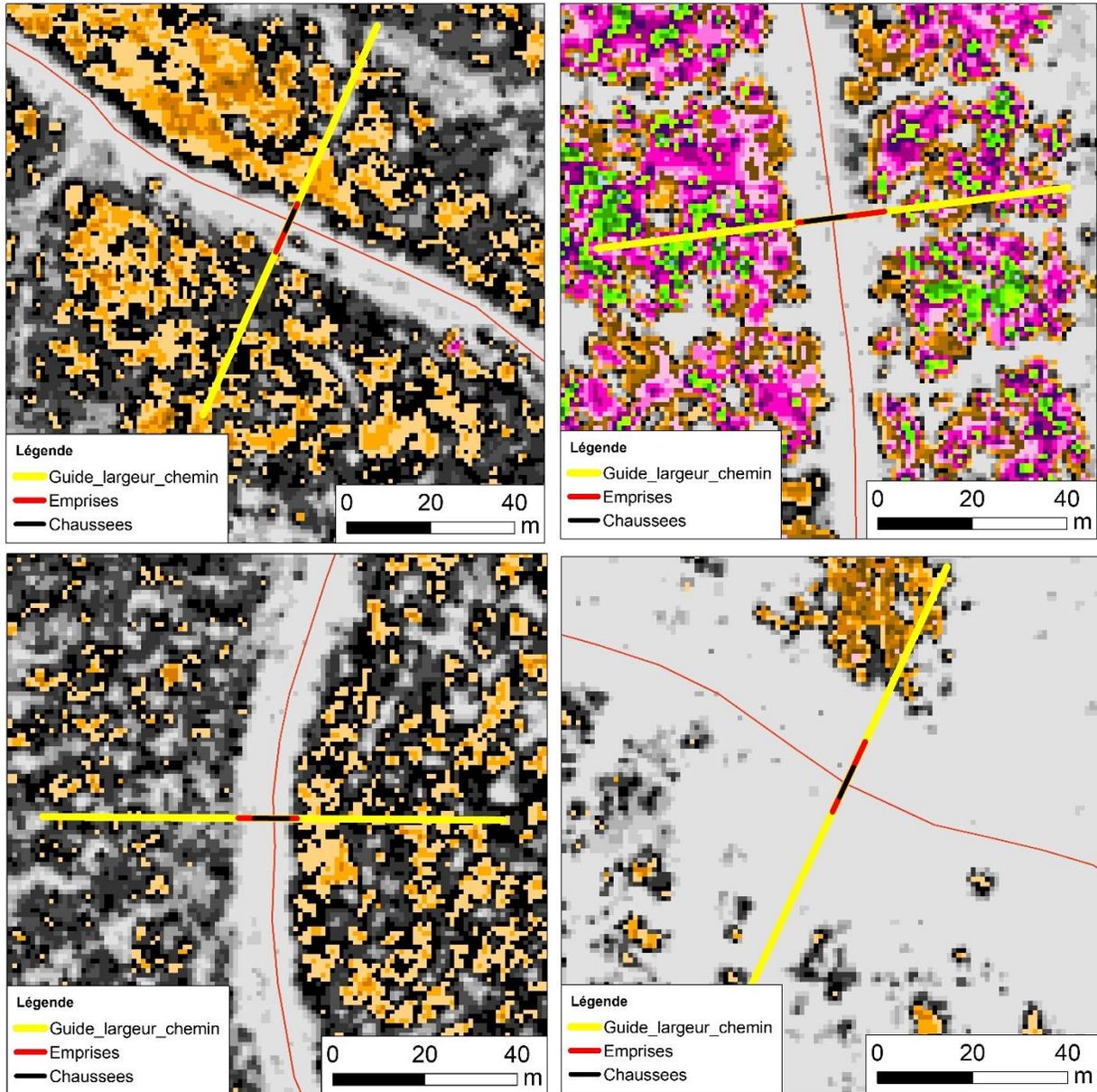


Figure 4 : Vectorisation de la largeur de l'emprise du chemin en se basant sur le MHC

La figure 5 présente un profil transversal typique d'une route forestière. On y observe la chaussée identifiable grâce à la présence d'une mise en forme ainsi que l'emprise présentant une végétation de faible hauteur.

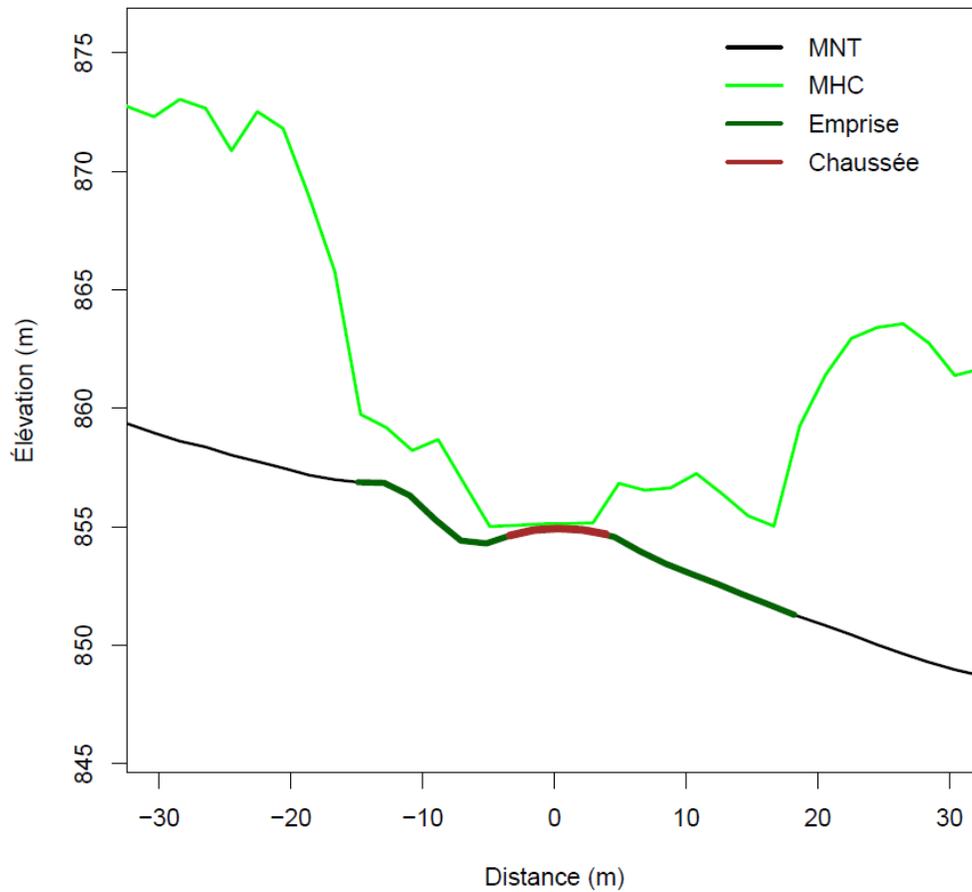


Figure 5 : Profil transversal d'un transect présentant le MNT, le MHC ainsi que l'emprise et la chaussée du chemin

Tableau 3 : Formulaires « Chaussées » et « Emprises »

Champs	Informations	Commentaires
OBSERV	*Text-50	Observateur
DATE	*Date	Aujourd'hui; cliquer sur le calendrier
CERTITUDE	Certain	Degré de certitude
	Incertain – Résolution photo aérienne	
	Incertain – LiDAR MNT ombré	
	Incertain – Végétation (MHC et imagerie)	
SOURCE_OBSERV1 SOURCE_OBSERV2 SOURCE_OBSERV3 SOURCE_OBSERV4	Photo aérienne	Sources d'observation disponibles et utilisées (1 à 4)
	MNT ombré	
	MHC	
	Écoulement LiDAR	
	GRHQ	
	Base de données existante	
AN_SOURCE1 AN_SOURCE2 AN_SOURCE3 AN_SOURCE4	*Text-50	Année de la source d'observation (1 à 4)
COMMENT	*Text-500	Commentaires sur le point d'observation
VALID_T	Oui	Validation terrain requise
	Non	

4.4 Création des réseaux hydrographiques d'analyse

Les résultats de la vectorisation des chemins et des ponceaux ont permis de produire trois réseaux hydrographiques différents. En addition à ces trois réseaux hydrographiques, le réseau de la Géobase du réseau hydrographique du Québec (GRHQ) a été utilisé à des fins d'analyse (figure 6).

Le premier réseau hydrographique « A – Sans brûlage des ponceaux » a été produit en utilisant l'algorithme de direction de flux unique D8 (Jenson & Dominique, 1988; O'Callaghan & Mark, 1984). Un seuil unique de 3 ha et calibré avec des données de terrain a été utilisé pour classifier l'accumulation de flux (Lessard, 2020). Afin d'éliminer les dépressions, l'algorithme « Breach Depressions Least-Cost » disponible dans le logiciel WhiteBoxTools (Lindsay, 2016) a été utilisé dans un premier temps. Cet algorithme se base sur la méthode de bréchage de Soille (2004). Ensuite, l'algorithme « Breach Depression » disponible dans le même logiciel a été utilisé dans un deuxième temps. Il se base quant à lui sur la méthode de Lindsay et Dhun (2015). L'usage successif de ces deux algorithmes de bréchage a été utilisé. Elle est décrite dans Lessard (2020). Il est à noter que les réseaux hydrographiques « B - Effacement des chemins » et « C - Brûlage des ponceaux » ont été soumis au même traitement décrit dans la méthode « A – Sans brûlage des ponceaux » après l'application des traitements expliqués dans les paragraphes ci-dessous.

Le réseau hydrographique « B - Effacement des chemins » a été produit avec la méthode d'effacement des chemins. Cette méthode permettant de détecter automatiquement les ponceaux se base sur la méthode d'effacement des chemins présenté par Avello et *al.* (2016). Elle est inspirée de la méthode décrite dans Lessard (2020) et dans C. Wang (2021). Premièrement, les chemins ont été effacés dans une zone tampon de 10 m de leur centreligne pour éliminer avec certitude la mise en forme dans le MNT. La majorité des chemins à la forêt Montmorency font en effet moins de 20 m de largeur, incluant la mise en forme et les fossés. L'espace vide créée au niveau des chemins dans le MNT a alors été rempli par interpolation spatiale selon la méthode du voisin naturel. Un réseau hydrographique a ensuite été généré sur ce nouveau MNT où la mise en forme des chemins a été théoriquement effacée par l'interpolation spatiale. Les endroits précis où des cours d'eau ont été modélisés dans la zone d'effacement des chemins ont alors été identifiés comme des segments correspondant à des ponceaux potentiels. Le MNT d'origine, soit sans l'effacement des chemins, a été utilisé à nouveau afin d'y effectuer le brûlage des segments de cours d'eau classifiés comme ponceaux potentiels. Enfin, les LEP ont généré à partir de ce nouveau MNT. La supposition de base de cette méthode est que la législation québécoise interdit de dévier un cours d'eau lors de la construction d'un

chemin (Ministère des Forêts, 2019). Les ponceaux devraient donc être théoriquement positionnés aux endroits qui correspondent aux cours d'eau sans l'influence de la mise en forme des chemins.

Le troisième réseau hydrographique, « C - Brûlage des ponceaux », a été généré avec la méthode de brûlage. Cette méthode consiste à appliquer la valeur minimale de l'élévation rencontrée sur le vecteur qui correspond aux ponceaux de la base de données de ponceaux géo-interprétées préalablement décrite à la section 4.2 (Li et *al.*, 2013). Le remblai du chemin ne cause ainsi plus de déviation de l'écoulement modélisé à l'endroit où se trouvent les ponceaux. Il s'agit ici du modèle de référence utilisé pour les analyses de comparaisons subséquentes.

Après tous les traitements effectués, le « Fill Sinks XXL » a été utilisé afin d'assurer une élimination complète des dernières dépressions restantes dans les trois MNT décrits ci-haut (Wang et Liu, 2006).

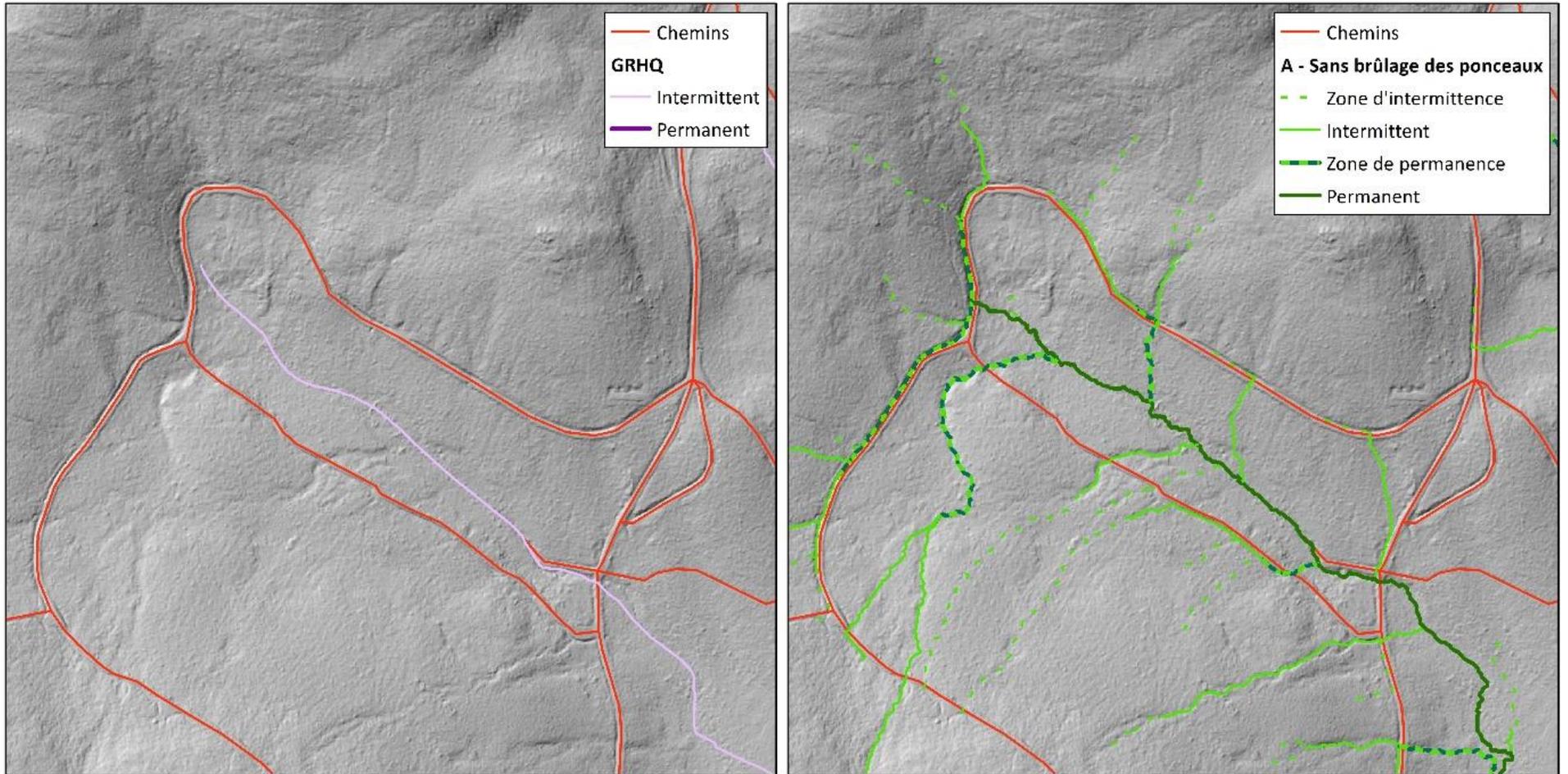


Figure 6 : Comparaison entre les trois réseaux hydrographiques modélisés et la GRHQ

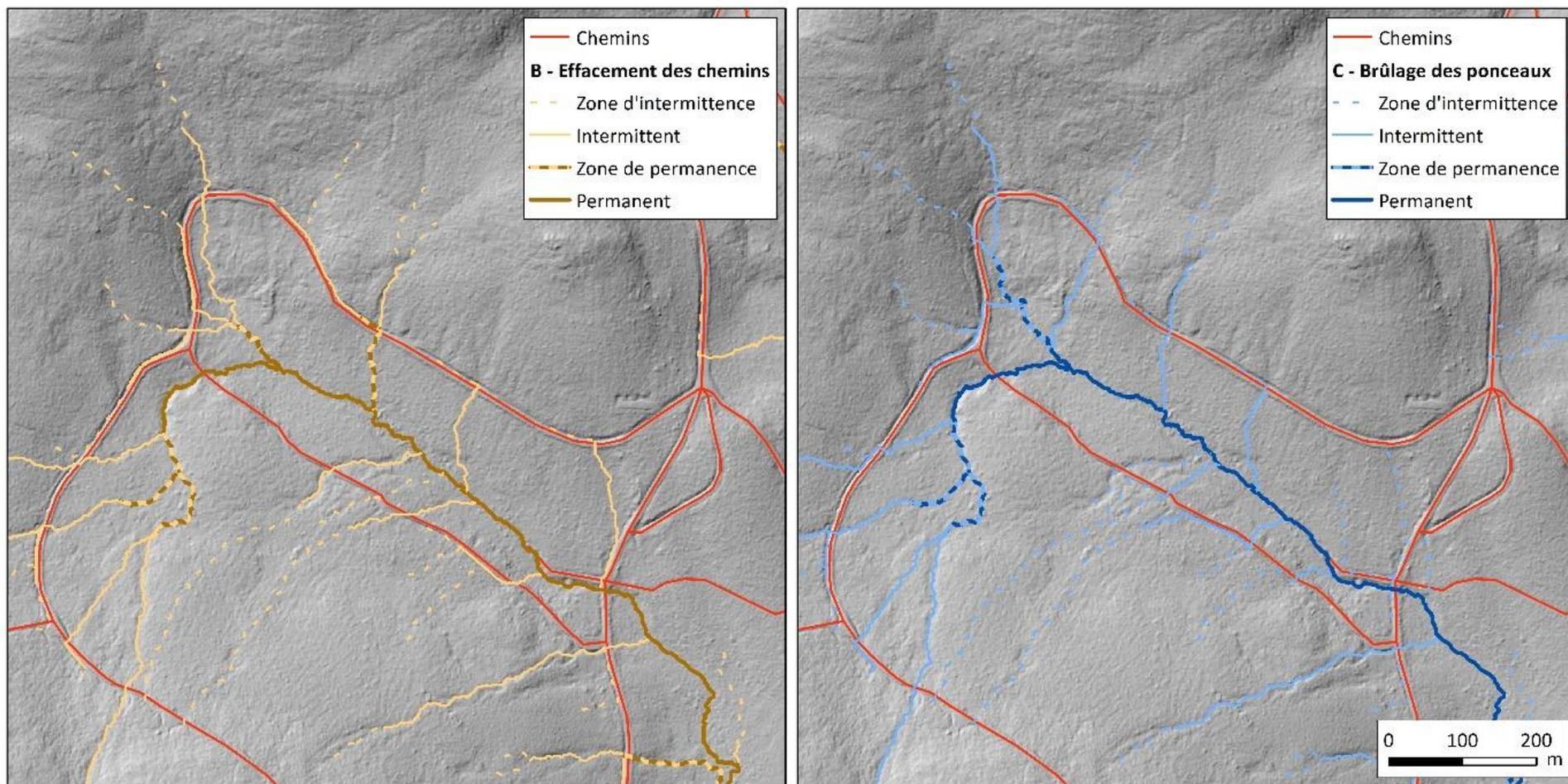


Figure 6 (suite) : Comparaison entre les trois réseaux hydrographiques modélisés et la GRHQ

5. Résultats et discussion

Les principaux résultats de la méthodologie de géo-interprétation ainsi que de brèves analyses de comparaison entre les divers réseaux routiers et hydrographiques sont présentés dans cette section.

5.1 Évaluation des ressources nécessaires

Trois auxiliaires de recherches ont réalisé l'ensemble des tâches de géo-interprétation à l'automne 2020 (tableau 4). Chaque tâche de géo-interprétation a été réalisée en totalité ou en partie par une même personne, favorisant ainsi une certaine homogénéité dans la vectorisation. Nous estimons également qu'environ 225 h ont été réalisées par deux professionnels de recherche. C'est donc près de 714 h qui ont été réalisées dans ce projet de cartographie sur un territoire de 676 km². Nous considérons que la principale faiblesse de la géo-interprétation consiste en des erreurs d'interprétations commises involontairement, et ce malgré un bon niveau de compréhension des enjeux. Effectivement, lors de l'exercice de validation des données, qui a été fait une fois que la géo-interprétation des auxiliaires eut été complétée, des incohérences ont été observées. Ainsi, un effort supérieur d'encadrement des auxiliaires par les professionnels de recherche aurait sans doute été bénéfique au projet, mais aurait considérablement augmenté l'investissement en ressources humaines et financières.

Tableau 4 : Détail des heures complétées

Ressource	Tâches	Nb. heures	Nb. d'heures par km ²
Auxiliaires de recherche	Géo-interprétation des chemins	187	0.3
	Géo-interprétation des ponceaux	197	0.3
	Géo-interprétation des emprises et chaussées	105	0.1
Professionnels de recherche	<ul style="list-style-type: none"> - Développement de la méthodologie - Préparation des modèles et des données nécessaires - Encadrement des auxiliaires - Développement des outils automatisés - Validation et ajustement des données des auxiliaires - Préparation des modèles d'analyses et analyses statistiques - Production du rapport 	225	0.3
	TOTAL	714	1

5.2 Résultats de la géo-interprétation

Un total de 1 561.64 km de chemins ont été vectorisés sur l'ensemble de la zone d'étude de 676 km². De ce nombre, 939.95 km se retrouvent sur le territoire de la forêt Montmorency (tableau 5), d'une superficie de 410 km². Il s'agit de 180 km sur le territoire de la FMA et de 760 km (695 km en excluant la route 175) sur le territoire de la FMB. Rappelons que comme l'objectif était de vectoriser avec exactitude les centrelignes du réseau routier, la vectorisation a été réalisée uniquement lorsqu'une mise en forme était visible sur le MNT ombré. Ainsi, il arrive par exemple qu'un segment présent dans le 4^e inventaire forestier soit absent de la base de données générée par géo-interprétation dans le cas où la mise en forme n'est pas visible sur le modèle ombré. Ces situations sont facilement identifiables en comparant les diverses sources de réseaux routiers. C'est près de 46 km du 4^e inventaire forestier et 330 km du 3^e inventaire forestier qui n'ont pas été vectorisés pour le territoire de la forêt Montmorency.

Tableau 5 : Détails de la géo-interprétation des chemins pour le territoire de la forêt Montmorency

	Longueur (km)	Longueur (km) par km ²
Géo-interprétation	939.95	2.3
4 ^e inventaire forestier	828.43	2
3 ^e inventaire forestier	1 007.98	2.5

En ce qui concerne le nombre de ponceaux, les résultats obtenus sont présentés au tableau 6. Les bases de données disponibles comprenaient 1 182 ponceaux géo-référencés sur le territoire de la forêt Montmorency, auxquels 2 702 entités qui ont été ajoutées grâce à la géo-interprétation. À l'échelle de la zone d'étude entière, il s'agit plutôt de 4 207 entités supplémentaires qui ont été géo-interprétées. Au total, 3 884 et 5 397 ponceaux sont identifiés sur le territoire de la forêt Montmorency (939.95 km de chemins) et sur la zone d'étude (1 561.64 km de chemins) respectivement. Il est à noter que la présence d'un ponceau n'est pas toujours évidente à observer par géo-interprétation. Évidemment, l'identification d'un ponceau associé à un cours d'eau permanent est plus fiable et précise que l'identification d'un ponceau associé à un cours d'eau intermittent ou à un drainage naturel. De plus, un inventaire exhaustif des ponceaux avait été réalisé sur le terrain pour certains secteurs, comme certaines portions de la FMA. À l'inverse, aucune base de données de référence n'était disponible pour d'autres secteurs, en particulier sur la FMB. En ce sens, bien que la nouvelle base de données ainsi créée est la référence la plus complète en la matière, elle ne fait pas office de vérité absolue. Il est également impossible d'extraire la réelle densité du nombre de

ponceaux sur le terrain par la géo-interprétation.

Tableau 6 : Détails de la géo-interprétation des ponceaux

	FM			Zone d'étude
	Nb. ponceaux	Nb. ponceaux par km de chemin	Nb. ponceaux par km ²	Nb. ponceaux
Présents dans une base de données existante	1 182	1.3	2.9	1 190
Ajoutés par géo-interprétation	2 702	2.9	6.6	4 207
TOTAL	3 884	4.2	9.5	5 397

Le tableau 7 présente les détails de la géo-interprétation des emprises et chaussées. Au départ, des guides ont été positionnés au 250 m sur l'ensemble du réseau routier interprété. Toutefois, la présence d'un guide ne signifie pas nécessairement que l'emprise et/ou la chaussée sont identifiables par géo-interprétation. C'est pour cette raison que le nombre d'emprises et de chaussées est inférieur au nombre de guides. Comme pour les ponceaux, les largeurs d'emprises et de chaussées peuvent présenter certains biais par rapport à la réalité terrain. Par exemple, une emprise dont les limites sont visibles de par un important contraste entre la hauteur du peuplement adjacent au chemin est plus fiable qu'une emprise déterminée dans un secteur où la végétation adjacente au chemin est de faible hauteur. Pour la vectorisation de la largeur de la chaussée, l'importance de mise en forme est directement liée au niveau de précision obtenue. La figure 7 permet de visualiser l'ensemble des données générées à l'échelle de la zone d'étude pour ces deux attributs. Les largeurs moyennes sont de 6.4 m et de 11.3 pour les chaussées et pour les emprises, respectivement.

Tableau 7 : Détails de la géo-interprétation des emprises et chaussées

	FM	Zone d'étude
Nombre de guides	3 949	6 453
Nombre d'emprises	3 669	6 027
Nombre de chaussées	3 690	6 105

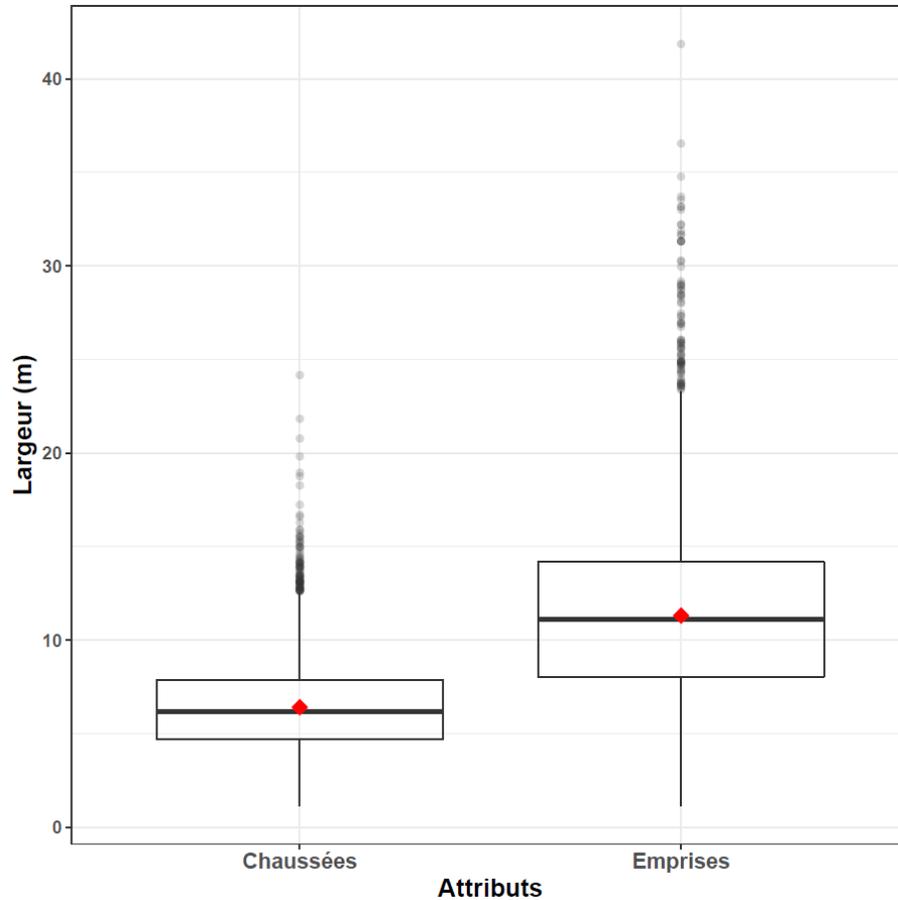


Figure 7 : Comparaison entre les valeurs de largeurs de chaussées et d'emprises géo-interprétés pour la zone d'étude présentée à l'aide de boîtes à moustaches. Les points rouges indiquent la valeur moyenne.

Au tableau 8, une comparaison entre les trois réseaux hydrographiques modélisés et la GRHQ est présentée pour le territoire de la forêt Montmorency selon la longueur totale du réseau ainsi que le nombre d'entités. On y observe que les trois modèles possèdent une longueur de réseau et un nombre de segments très similaire, et bien supérieur à ce qui est présent dans la GRHQ. Dans les trois cas, la densité du réseau est de près de 3.4 fois la densité du réseau de la GRHQ.

Tableau 8 : Comparaison des réseaux hydrographiques modélisés et la GRHQ pour le territoire de la forêt Montmorency (410 km²)

	Longueur (km)	Nb. d'entités
A - Sans brûlage des ponceaux		
Intermittent	1 156	5 556
Permanent	438.5	2 506
TOTAL	1 594.5	8 062
B - Effacement des chemins		
Intermittent	1 186.6	5 777
Permanent	422.9	2 552
TOTAL	1 609.5	8 329
C - Brûlage des ponceaux		
Intermittent	1 173	5 676
Permanent	423.1	2 522
TOTAL	1 596.1	8 198
GRHQ		
Intermittent	289.9	427
Permanent	172.5	309
TOTAL	462.4	736

5.3 Analyses de comparaison des réseaux

Le *coefficient of line correspondence* (CLC) a été utilisé afin de comparer les réseaux routiers ainsi que les réseaux hydrographiques. Cette méthode permet de calculer les taux d'omission et de commission entre différents réseaux linéaires par superposition spatiale. La méthode utilisée se base sur l'évaluation de la densité des segments en format matriciel.

Le tableau 9 montre les résultats du CLC entre les différents réseaux routiers comparés. La valeur du CLC est comprise entre 0 et 1. Elle décrit la performance du réseau comparé avec un réseau de référence. Une valeur de 0 décrit deux réseaux n'ayant aucune superposition et une valeur de 1 correspond à une superposition parfaite. Les taux d'omission et de commission sont présentés dans ce tableau. Le réseau routier de référence constitue celui géo-interprété. Ce dernier a été comparé avec le réseau routier du 3^e inventaire décennal et celui issu du 4^e inventaire décennal. Deux distances d'analyses ont été utilisées dans le but de comparer les réseaux routiers sous différents aspects. Une distance de 50 m a été utilisée afin d'évaluer si un chemin était présent ou non dans les bases de données. Puis, une distance de 10 m a permis d'évaluer l'exactitude spatiale du centreligne des chemins dans les bases de données.

Tableau 9 : Résultats du CLC des réseaux routiers du MFFP comparés au réseau routier géo-interprété

Réseau comparé	Distance d'analyse (m)	CLC	Omission (%)	Commission (%)
3 ^e inventaire écoforestier	50	0.57	45.39	40.45
3 ^e inventaire écoforestier	10	0.46	55.51	51.82
4 ^e inventaire écoforestier	50	0.83	9.73	23.41
4 ^e inventaire écoforestier	10	0.51	45.65	52.31

Les résultats suggèrent que la base de données du réseau routier du 3^e inventaire décennal est désuète tant au niveau de la présence des chemins que de l'exactitude des centrelignes. La distance d'analyse de 50 m permet de dire que 45.39 % des chemins sont absents des bases de données. Également, 40.45 % des chemins de cette base de données sont inexistantes ou non perceptibles avec l'aide du MNT ombré. Quant au 4^e inventaire, la distance d'analyse de 50 m permet de dire que cette base de données contient la grande majorité du réseau routier. Seulement 9.73 % du réseau routier est omis de la base de données. Par contre, cette base de données contient beaucoup d'entités (23.41 %) décrivant des chemins qui ne sont pas visibles sur le MNT dérivé du LiDAR. En analysant avec une distance de 10 m, il est possible de dire que les centrelignes du réseau routier issus du 4^e inventaire décennal ne sont pas exacts. En effet, l'omission passe à 45.65 %

avec cette plus faible distance d'analyse.

Ensuite, le tableau 10 montre les résultats du CLC, mais cette fois-ci entre les différents réseaux hydrographiques. Le réseau hydrographique de référence pour la comparaison est celui où tous les ponceaux ont été brûlés (voir « C - Brûlage des ponceaux » du tableau 8). Étant donné que le territoire couvre une très grande superficie et qu'aucun inventaire de terrain n'a pu être effectué à cette échelle, la supposition de base suivante a dû être posée : le réseau hydrographique avec les ponceaux brûlés est celui représentant le mieux la réalité. Les segments des réseaux hydrographiques dans les lacs et les cours d'eau à deux rives ont été exclus de l'analyse. Il était en effet important de comparer uniquement des cours d'eau n'étant pas de trop grande envergure.

Tableau 10 : Résultats du CLC des réseaux hydrographiques comparés au réseau hydrographique généré par brûlage des ponceaux

Réseau comparé	Distance d'analyse (m)	CLC	Omission (%)	Commission (%)
A - Sans brûlage des ponceaux	10	0.91	9.51	9.46
B - Effacement des chemins	10	0.87	13.74	13.24
GRHQ	10	0.22	46.58	86.91

Les résultats du tableau 10 démontrent que si les ponceaux ne sont pas brûlés, il y a une omission et une commission d'environ 9 à 10 % des segments du réseau hydrographique. Avec la méthode d'effacement des chemins, le réseau hydrographique diffère davantage que lorsqu'aucun ponceau n'est brûlé. On augmente l'omission et la commission d'environ 3 à 4 % entre les deux méthodes. Ceci s'explique par le décalage des ponceaux potentiel par rapport aux ponceaux réels. Ainsi, cela provoque des déviations sur de plus grandes distances que si aucun ponceau n'avait été brûlé. De plus, il arrive que certains ponceaux potentiels soient très proches l'un de l'autre et que les deux soient brûlés. Il pourrait être judicieux de combiner de tels ponceaux avec une distance de recherche pour éviter les doublons (C. Wang, 2021). En ce qui concerne le réseau hydrographique de la GRHQ, le tableau 10 démontre que ce dernier est très inexact par rapport au réseau hydrographique issu du lidar et dont tous les ponceaux ont été brûlés. En plus d'omettre 46.58 % des cours d'eau, ce dernier possède une très faible exactitude spatiale et 86.91 % des segments de la GRHQ ne sont pas superposés au réseau hydrographique de référence. Il est donc conseillé de remplacer le réseau hydrographique de la GRHQ par un réseau hydrographique issu du lidar dont le seuillage a été effectué selon des données de terrain et dont tous les ponceaux ont été brûlés.

6. Extraction automatisée du réseau routier forestier et de ses attributs

Des développements ont été effectués afin d'automatiser l'extraction du réseau forestier et de ses attributs. Ces développements n'ont jusqu'à maintenant pas permis d'extraire avec suffisamment de précision les chemins, les ponceaux, les emprises et les chaussées. Ces outils permettent néanmoins d'extraire de l'information permettant de faciliter l'interprétation lors de la géo-interprétation du réseau routier forestier.

Pour l'extraction des centrelignes des chemins, les données brutes du LiDAR sont nécessaires afin de générer une matrice de densité de points de la classe « Sol », une matrice de variation en Z des points et finalement une matrice d'intensité. Grâce à ces données en entrée et à la méthode décrite dans le projet de fin d'études de Léo Painchaud (Painchaud, 2018), il a été possible d'extraire des polygones représentant le réseau routier (figure 8). C'est à partir de ces polygones que des centrelignes représentant le réseau routier ont été extraits. La figure 9 présente une comparaison entre différentes sources de données : la vectorisation manuelle, l'extraction automatisée et le 4^e inventaire forestier. On y observe notamment que des parties de segments de l'extraction automatisée correspondent parfaitement avec ceux de la vectorisation (ici la référence) à certains endroits. Toutefois, cette extraction n'est pas parfaite pour différentes raisons. L'absence de nombreux tronçons, le positionnement imprécis du centreligne aux intersections ainsi que la présence de nombreuses virées lorsque le chemin est plus large que la normale, soit par la présence d'une aire d'ébranchage ou d'une ouverture forestière en bordure du chemin, en sont les principales raisons.

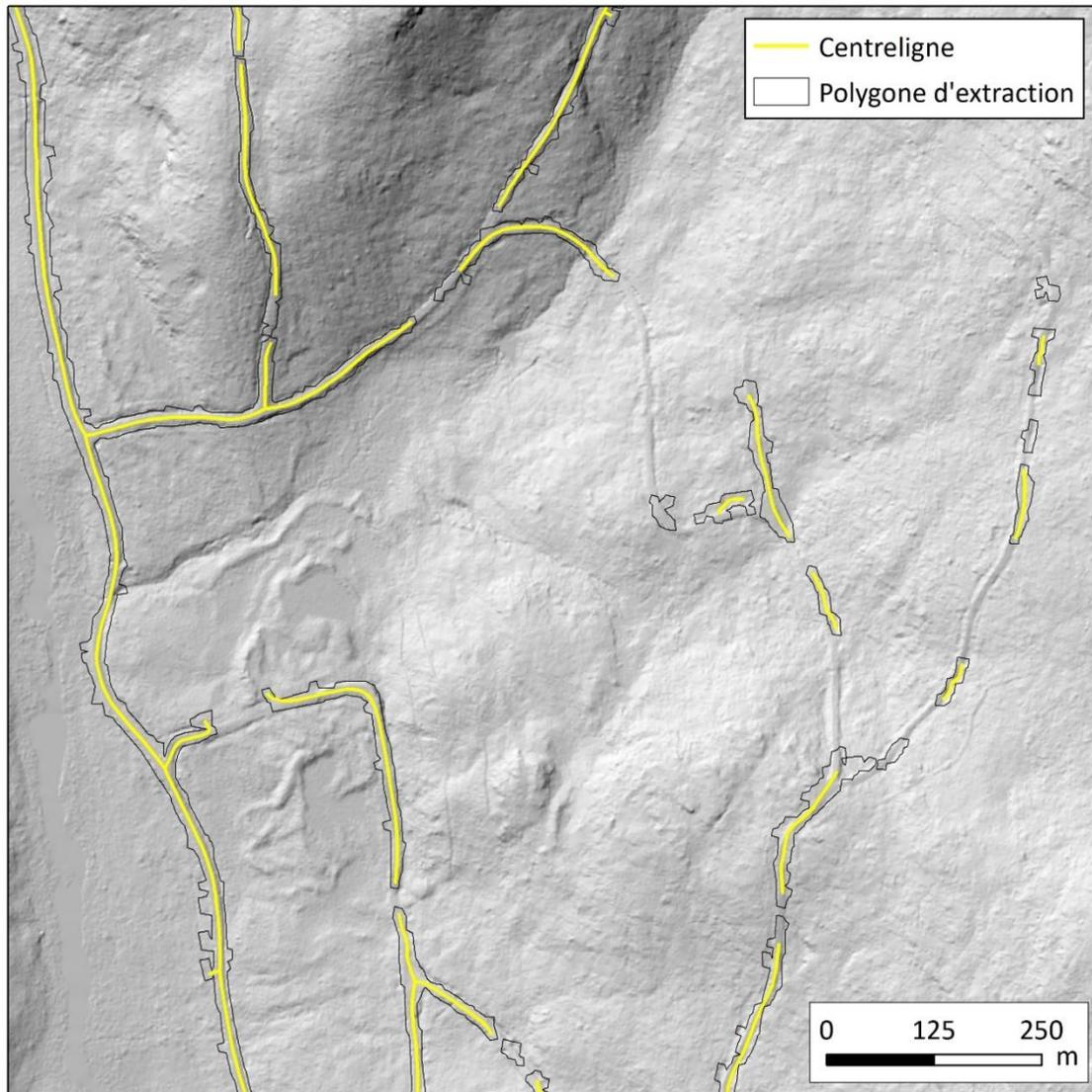


Figure 8 : Polygones d'extraction et centrelignes du réseau routier généré à partir de données LIDAR selon la méthode de Painchaud (2018)

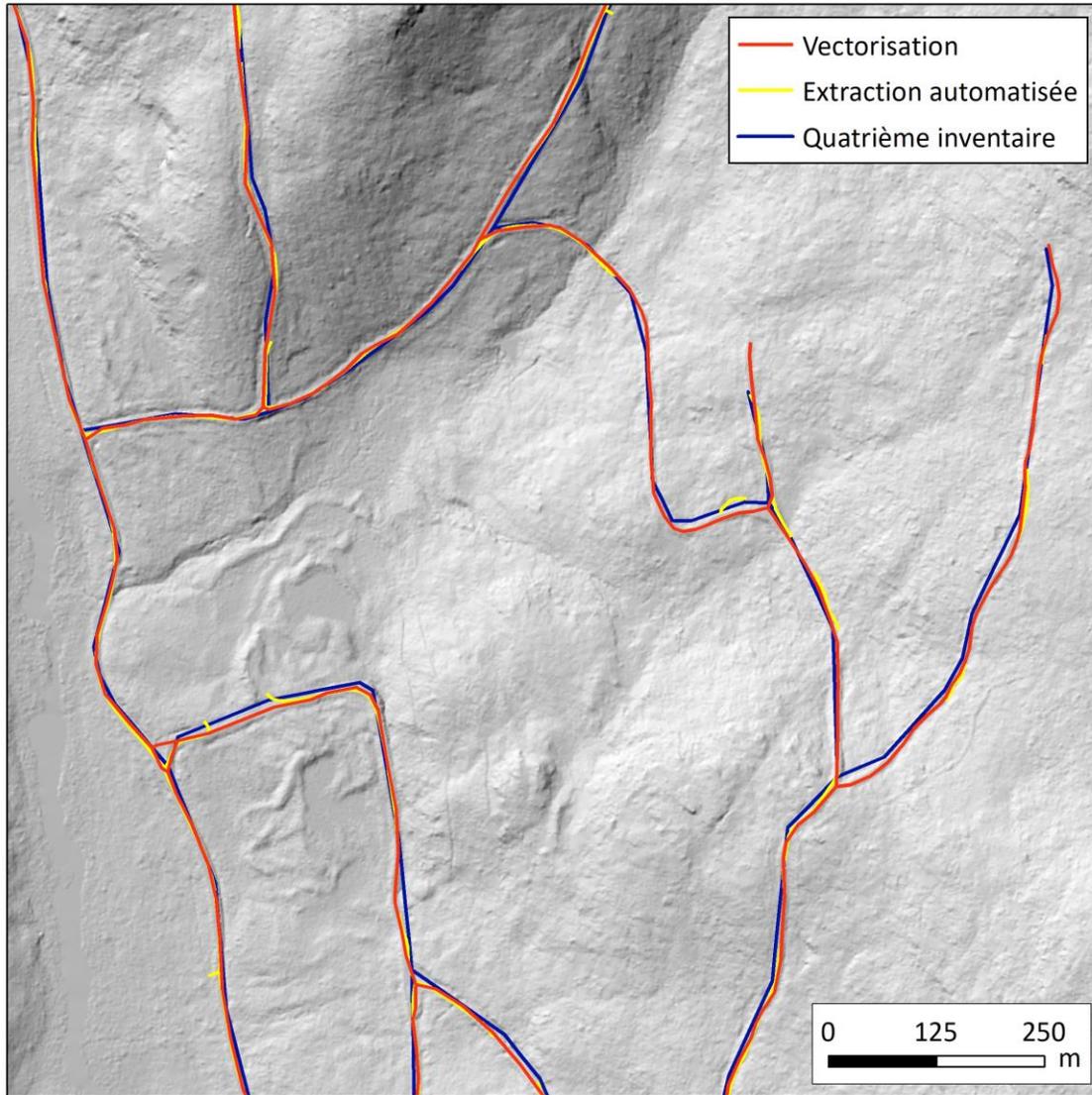
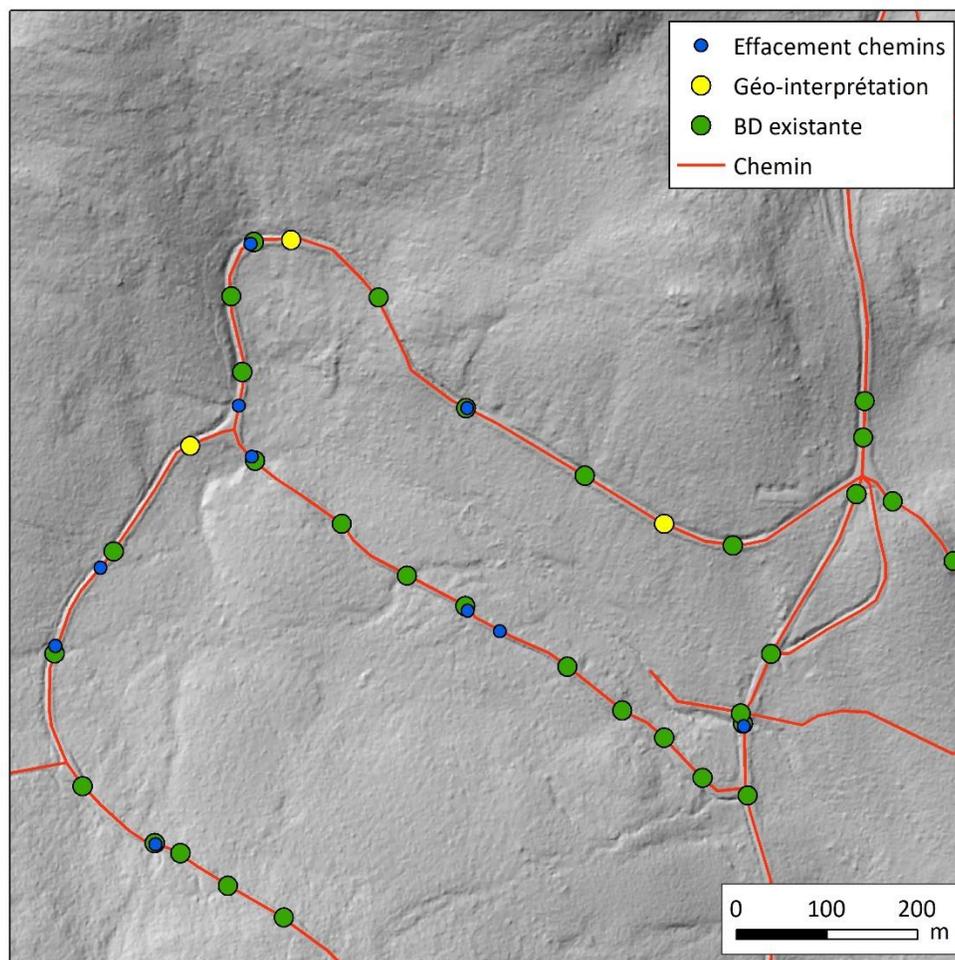


Figure 9 : Comparaison entre la vectorisation, l'extraction automatisée et le 4^e inventaire forestier

Nous avons également comparé les ponceaux présents dans la base de données de référence, qui comprend des ponceaux de bases de données existantes et positionnés par géo-interprétation, avec les ponceaux positionnés automatiquement en utilisant les segments intermittents et permanents de LEP générés avec la méthode « B - Effacement des chemins ». Nous avons rapidement constaté des biais importants entre les deux sources de données (figure 10). Ainsi, il ne nous apparaît pas convenable d'utiliser la méthode « B - Effacement des chemins » pour générer automatiquement une base de données de ponceaux avec un niveau de fiabilité adéquat. Néanmoins, plusieurs ajustements sont possibles afin de tirer profit de cette méthode. Par exemple, un seuil d'accumulation de flux inférieur pourrait être utilisé selon le territoire. À la forêt Montmorency, un seuil de 15 000 m² plutôt que de 30 000 m² aurait probablement donné des résultats plus intéressants. Un total de 3 884 ponceaux pour le territoire de la forêt Montmorency est actuellement présent dans la base de données de référence. Toutefois, 2 515 segments ont été identifiés comme de potentiels ponceaux avec la méthode d'effacement des chemins.



En ce qui concerne l'extraction automatisée de l'emprise et de la chaussée, l'outil se base sur la variation en Z des points LiDAR. Lorsque la variation en Z est inférieure à 5 m, il s'agit d'une zone pouvant potentiellement être associée à l'emprise du réseau routier. Lorsque la variation en Z est inférieure à 0.5 m, il s'agit potentiellement de la chaussée de la route. Divers filtres sont toutefois nécessaires afin d'éliminer de nombreuses incohérences. La figure 11 présente une comparaison entre la vectorisation manuelle et l'extraction automatisée. On constate ici qu'aucune méthode ne semble parfaite. Dans les deux cas, des irrégularités ont été identifiées. En effet, même par géo-interprétation, il n'est pas toujours évident d'établir les limites des emprises et des chaussées par géo-interprétation.

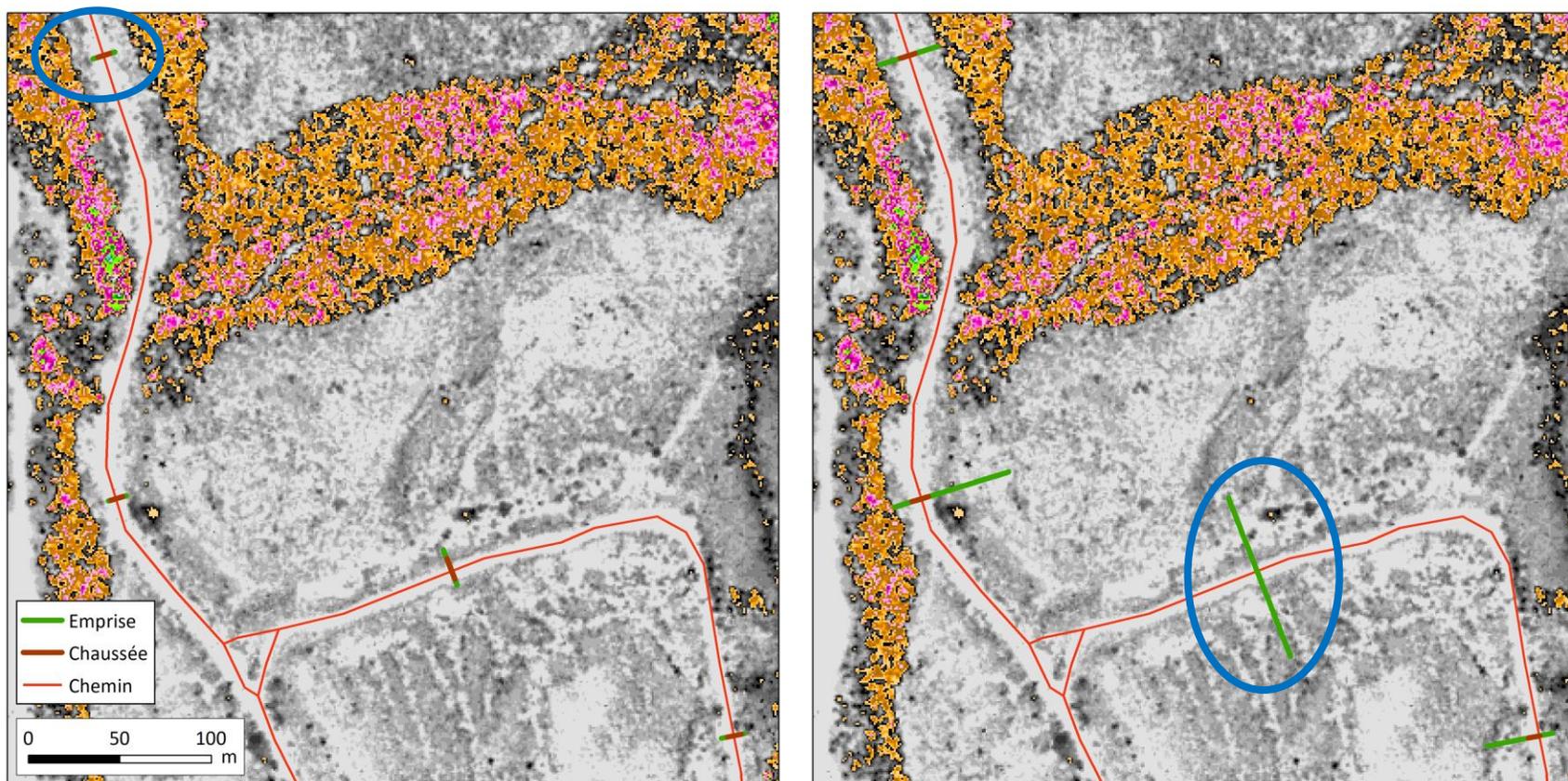


Figure 11 : Comparaison entre la vectorisation manuelle (à gauche) et l'extraction automatisée (à droite) de l'emprise et de la chaussée du chemin. Dans les deux cas, des irrégularités sont identifiées par les cercles.

7. Opportunités de recherche et de développement

L'extraction automatisée du réseau routier a permis de démontrer que pour les endroits où l'emprise de la route est suffisamment large, c'est-à-dire que la variation en Z est inférieure à 0.5 m dû à l'absence de la végétation, il est possible d'extraire pour la grande majorité des cas un centreligne très précis des chemins. Malheureusement, pour les endroits où les chemins sont sous le couvert forestier, l'algorithme ne permet pas de trouver les chemins et le réseau routier résultant est très fractionné. Davantage de recherche en ce sens devra être effectuée afin d'extraire un réseau routier complet basé sur la mise en forme perceptible dans le MNT. L'utilisation d'indices morphométriques basée sur le MNT ou bien le nuage de points LiDAR serait une manière d'extraire plus précisément la mise en forme des chemins sous le couvert forestier. Il apparaît que la faible densité de points ainsi que la résolution trop grossière du MNT sont des facteurs limitants pour l'extraction des plus petits chemins sous le couvert forestier.

De plus, la méthode d'effacement des chemins qui permet de créer un MNT sans la mise en forme des chemins permettrait d'extraire une matrice décrivant la mise en forme de tous les chemins d'un territoire. Il suffirait de soustraire le MNT brut par le MNT sans les chemins afin de normaliser la hauteur du remblai. De nombreux métriques associés aux chemins pourraient ainsi être extraits plus efficacement.

8. Conclusion

Dans un contexte où des données aussi précises que le LiDAR aéroporté deviennent de plus en plus disponibles, il devient impératif de faire suivre l'exactitude spatiale des autres données qui y sont rattachées.

La grande précision du MNT dérivé du LiDAR permet de le visualiser avec un effet d'ombrage pour détecter très précisément les chemins et les ponceaux du territoire par géo-interprétation. Une base de données décrivant les chemins positionnés sur le centre de ces derniers constitue une avancée majeure quant aux connaissances pour la gestion de l'eau au Québec. Il apparaît également nécessaire d'également positionner tous les ponceaux du réseau routier.

Enfin, ces nouvelles entités spatiales décrivant la voirie forestière permettent de décrire définitivement mieux le réseau hydrographique du territoire en appliquant des méthodes d'effacement des chemins ou de brûlage des ponceaux.

9. Remerciements

Nous tenons à remercier Laurence Gareau, Marilou Yargeau, Philippe Loranger et Stéphanie Tousignant pour le travail de géo-interprétation accompli avec rigueur ainsi que la forêt Montmorency pour le partage des données existantes concernant le réseau routier. Antoine Leboeuf, Jean-François Bourdon et Marc-Olivier Lemonde de la Direction des inventaires forestiers (DIF) du MFFP ont également contribué à la réalisation de ce projet.

Références

- Avello, T. D., Brennan, J., & Loomis, L. (2016). Modifying Digital Elevation Models to Develop More Realistic Wetness Index Layers for Soil Survey Applications. *NCSS Newsletter, May*, 11.
- Jenson, S. K., & Dominique, J. O. (1988). Extracting topographic structure from digital elevation data for geographic information system analysis. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 54*(11), 1593–1600. [https://doi.org/0099-1112/88/5411-1593\\$02.25/0](https://doi.org/0099-1112/88/5411-1593$02.25/0)
- Lessard, F. (2020). Optimisation cartographique de l'hydrographie linéaire fine. Mémoire de maîtrise. Université Laval.
- Li, R., Tang, Z., Li, X., & Winter, J. (2013). Drainage Structure Datasets and Effects on LiDAR-Derived Surface Flow Modeling. *ISPRS International Journal of Geo-Information, 2*(4), 1136–1152. <https://doi.org/10.3390/ijgi2041136>
- Lindsay, J. B. (2016). Whitebox GAT: A case study in geomorphometric analysis. *Computers and Geosciences, 95*, 75–84. <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2016.07.003>
- Lindsay, J. B., & Dhun, K. (2015). Modelling surface drainage patterns in altered landscapes using LiDAR. *International Journal of Geographical Information Science, 29*(3), 397–411. <https://doi.org/10.1080/13658816.2014.975715>
- Ministère des Forêts, de la F. et des P. (2019). Guide d'application du Règlement sur l'aménagement durable des forêts du domaine de l'état. In *Gazette officielle du Québec. Éditeur officiel du Québec*.
- O'Callaghan, J. F., & Mark, D. M. (1984). The extraction of drainage networks from digital elevation data. *Computer Vision, Graphics, & Image Processing, 28*(3), 323–344. [https://doi.org/10.1016/S0734-189X\(84\)80011-0](https://doi.org/10.1016/S0734-189X(84)80011-0)
- Painchaud, L. (2018) Extraction et caractérisation des chemins forestiers a l'aide de données LiDAR. Projet de fin d'études de premier cycle. Université Laval.
- Paradis Lacombe, P. (2018). Caractérisation de l'état et de la durabilité des traverses de cours d'eau sur les chemins forestiers. Mémoire de maîtrise. Université Laval.
- Soille, P. (2004). Morphological carving. *Pattern Recognition Letters, 25*(5), 543–550. <https://doi.org/10.1016/j.patrec.2003.12.007>
- Wang, C. (2021). *Mapping Drainage Structures Using Airborne Laser Scanning by Incorporating Road Centerline Information*.
- Wang, L., & Liu, H. (2006). An efficient method for identifying and filling surface depressions in digital elevation models for hydrologic analysis and modelling. *International Journal of Geographical Information Science, 20*(2), 193–213. <https://doi.org/10.1080/13658810500433453>