HAL
open science

Extraction de structures linéaires archéomorphologiques de données LiDAR brutes en contexte montagneux

Philippe Even, Phuc Ngo

To cite this version:

Philippe Even, Phuc Ngo. Extraction de structures linéaires archéomorphologiques de données LiDAR brutes en contexte montagneux. Remuer Ciel et Terre. L'apport du LiDAR en archéologie, Apr 2022, Saint-Etienne-lès-Remiremont, France. hal-03354894v2

HAL Id: hal-03354894

https://hal.science/hal-03354894v2

Submitted on 2 Nov 2021

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

EXTRACTION DE STRUCTURES LINÉAIRES ARCHÉOMORPHOLOGIQUES DE DONNÉES LIDAR BRUTES EN CONTEXTE MONTAGNEUX

Philippe Even et Phuc Ngo

Université de Lorraine, CNRS, LORIA, Nancy, F-54000, France – (philippe.even, hoai-diem-phuc.ngo)@loria.fr

ABSTRACT:

Cet article synthétise les résultats des travaux exploratoires visant à étudier les apports des notions et outils récents de géométrie discrète pour l'extraction de structures linéaires de données LiDAR (Even and Ngo, 2020, Even et al., 2021). Contrairement aux approches classiques basées sur l'analyse du modèle numérique de terrain, les techniques mises au point dans ce travail exploitent directement les points 3D classés "sol" pour s'affranchir des interpolations inhérentes à la production d'une grille régulière de valeurs altimétriques à partir de données éparses. Dans cet objectif, les données LiDAR du Fossard ont constitué un cadre de test bien adapté, compte tenu de la forte disparité de densité des points obtenue dans ce massif forestier fortement couvert de résineux, peu propices à la pénétration du laser.
Un cadre algorithmique général basé sur l'analyse de profils a été développé pour extraire différents types de structures linéaires. Il a d'abord été appliqué au cas des pistes forestières, en s'appuyant sur un modèle adapté au relief de montagne: un replat bordé de zones pentues. Dans cette approche interactive, l'utilisateur place une graine, à savoir un trait en travers de la structure repérée sur une vue du modèle numérique de terrain. L'extraction est instantanément lancée dans le nuage de points à partir de cette position et le résultat est produit en une fraction de seconde. Les bonnes performances en temps et en précision ont permis une automatisation complète de l'extraction des pistes (Even and Ngo, 2021). Un test mené à grande échelle (313 dalles, 78 km^2) a montré des performances de détection de l'ordre de 70% en couverture et en précision, pour un temps de traitement d'environ 30 minutes.
Ensuite, un autre modèle a été proposé pour l'extraction interactive de structures linéaires en élévation ou en creux. Il prend en compte une estimation du relief local pour affiner leur localisation et permettre l'estimation de grandeurs géométriques telles que l'aire des sections transversales ou le volume de la structure sur une section déterminée.
L'extraction interactive de structures linéaires a été intégrée dans un logiciel libre multi-plateformes, ILSD, pour permettre une plus large exploitation. L'outil a été testé sur deux contextes applicatifs concrets: l'extraction de portions dégagées et de portions encore enfouies des enceintes du Saint-Mont, puis l'étude de plusieurs séries de chemins creux sur la partie sud du Fossard. Ces travaux expérimentaux menés par les partenaires archéologues et géomorphologues du projet, ont permis de valider l'apport de ce type d'outil en complément de l'analyse visuelle classique du modèle numérique de terrain.

1. INTRODUCTION

Le LiDAR (*Light Detection And Ranging*) est un outil de mesure 3D basé sur le balayage d'un signal laser sur une scène cible, et la réception des échos renvoyés par les obstacles touchés. Dans le cas présent, le capteur est embarqué dans un avion, et balaye le terrain survolé en parcourant des sillons pour obtenir une couverture complète. Combinée avec d'autres systèmes de localisation relative ou absolue embarqués, la mesure du temps de vol du signal délivre une cartographie complète du site (Wehr and Lohr, 1999).

En contexte forestier, le signal reçu comporte plusieurs échos correspondant aux différents obstacles rencontrés avant de toucher le sol, depuis la canopée, jusqu'aux niveaux de végétation basse. Un pré-traitement de classification des points tri-dimensionnels déduits de chaque écho est effectué pour discriminer ceux correspondant au sol de ceux correspondant aux couches de végétation, aux étendues d'eau, aux lignes électriques, ou encore aux constructions. Les capteurs actuels, dits à forme d'onde pleine, échantillonnent l'intégralité du signal, délivrant ainsi une information plus riche que le simple enregistrement des échos principaux, et une classification plus fine (Mallet and Bretar, 2009, Doneus et al., 2008, Lasaponara et al., 2011). Mais cette mesure délivre une quantité de données coûteuse en stockage, et souvent, seul le nuage de points classifiés est conservé, constituant les données brutes du LiDAR. Dans la suite de ce travail, seule la portion de points classés "sol" est exploitée.

Malgré les avancées régulières dans le domaine de la visualisation de nuages de points 3D (Katz and Tal, 2013), le résultat ne permet toujours pas de disposer d'une bonne perception des détails du relief. Aussi, le traitement suivant est la production d'un modèle numérique de terrain (MNT) par interpolation des points épars classés "sol" à l'intérieur d'une grille régulière (Axelsson, 2000, Evans and Hudak, 2007). Ce traitement est souvent mené en parallèle de la classification. La carte d'information altimétrique obtenue peut alors être affichée à l'aide de toute une panoplie de techniques de visualisation de surfaces (Devereux et al., 2008, Hesse, 2010, Kokalj et al., 2011). Chacune révèle des détails spécifiques, et aucune ne convient pour tous types d'usage. Elles doivent être testées alternativement selon les variations altimétriques du terrain, ou encore la nature des détails à repérer (Challis et al., 2011, Bennett et al., 2012, Štular et al., 2012, Mayoral et al., 2017).

Le LiDAR souligne des subtilités de relief souvent peu repérables sur site, en particulier quand elles sont de faible amplitude mais d'emprise large. Une inspection multi-échelle du MNT ou des analyses statistiques à l'aide d'un système d'information géographique (SIG) permettent alors de bien les détecter (Rowlands et al., 2006, Jones et al., 2007, Coluzzi et al., 2010, Lasaponara et al., 2010, Nuninger et al., 2010, Hesse, 2014, McNeary, 2014). Cet avantage est amplifié dans le cas de sites sous forêt ou couverts d'une dense végétation basse. Le LiDAR offre alors une visualisation à nu du terrain, dévoilant de nombreux détails (Sittler, 2004, Sittler and Schellberg, 2006, Doneus and Briese, 2006, Lasaponara et al., 2010, Georges-Leroy et al., 2011). Le MNT peut cependant comporter des approximations conséquentes liées aux variations de densité du nuage de points traité. L'utilisateur n'en a pas toujours conscience (Jones et al., 2007). En particulier, les plantations serrées de résineux sont un obstacle important à la pénétration du faisceau laser (Popescu et al., 2002, Amable et al., 2004, Devereux et al., 2005).

Cet article synthétise les travaux menés dans le cadre du projet interdisciplinaire SolHoM-Fossard de l'Université de Lorraine de 2019 à 2021, autour de l'étude de l'apport d'outils récents de géométrie discrète pour l'extraction de structures linéaires de données LiDAR (Even and Ngo, 2020, Even and Ngo, 2021, Even et al., 2021). L'ensemble du projet portait sur l'étude de l'impact de l'homme sur son environnement aux époques passées ou actuelle. Le terrain retenu pour cette étude est la partie sud du massif du Fossard, Vosges, France. Ce site comporte notamment de nombreuses structures linéaires, réseaux de murs médiévaux, anciens chemins, limites de parcelles, ruptures de pentes, etc... Leur détection et leur visualisation ont donc constitué le fil conducteur des contributions en informatique sur ce projet. Dans ce contexte exploratoire, seuls des outils de géométrie discrète ont été mis en œuvre afin de bien mettre en évidence leur potentiel et leurs limites. Par ailleurs, les algorithmes d'extraction développés n'exploitent que les points 3D classés "sol", évitant ainsi la propagation des approximations du MNT.

Dans un premier temps, un cadre algorithmique général pour extraire une structure linéaire en mode supervisé (Even and Ngo, 2020) a été développé et testé sur le cas des pistes forestières. Ces objets bien marqués dans le DTM produisent des vérités de terrain commodes pour évaluer les performances de l'approche. Une automatisation complète de la détection des pistes a été proposée et validée à grande échelle sur l'ensemble du Fossard (Even and Ngo, 2021). En parallèle, le cadre initial a été complété par l'extraction de structures en élévation (murs, ruptures de pentes) ou en creux (chemins creux, vallons), et intégré dans un outil logiciel multi-plateforme librement accessible (fig. 1), pour permettre une validation sur des cas d'étude concrets de l'outil par des archéologues (Even et al., 2021).

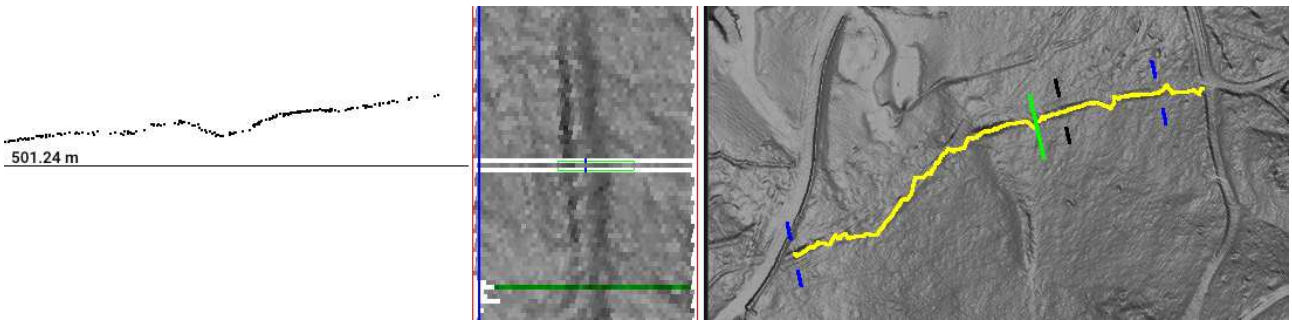

Figure 1. Extraction interactive d'un chemin creux : à gauche, un profil altimétrique de points; au centre, les scans analysés; à droite, la structure extraite superposée au MNT (en vert, la barre initiale; en noir, l'emplacement du profil analysé; en bleu, les bornes sélectionnées pour la mesure du volume).

La suite de l'article est structurée de la façon suivante: la section 2 offre un panorama sur différentes approches existant dans la littérature pour l'extraction de structures de données LiDAR; les données LiDAR exploitées sont présentées en section 3, puis la section 4 explique l'utilisation faite des outils de géométrie discrète; le cadre général pour l'extraction de structures linéaires et les adaptations au cas des pistes forestières et des structures en creux ou en élévation sont décrits en section 5. La section 6 donne les résultats des tests de performance et d'utilisabilité en contexte applicatif concret de l'outil ILSD. Une automatisation complète de l'extraction des pistes est succinctement présentée en section 7. L'article s'achève sur une discussion générale en section 8, puis sur une conclusion et les perspectives ouvertes en section 9.

2. APPROCHES EXISTANTES POUR L'EXTRACTION DE STRUCTURES LINÉAIRES

La plupart des outils automatiques ou semi-automatiques de détection de structures dans des données LiDAR reposent sur l'analyse du MNT car il apparaît plus simple de traiter une grille régulière de valeurs altimétriques qu'un ensemble de points 3D épars. Il est alors possible d'utiliser directement les techniques bien rodées et largement diffusées de traitement d'images. Bon nombre d'assistances logicielles basées sur des traitements au niveau des pixels ou d'objets plus structurés ont ainsi pu être intégrées aux SIG pour faciliter la numérisation de structures depuis le MNT (Sevara et al., 2016). Quelques solutions ont été proposées pour automatiser l'extraction de structures locales en repérant la signature particulière de ces formes dans le MNT et en calant un modèle géométrique sur les indices visuels trouvés (Trier et al., 2015, Toumazet et al., 2017). Dans le cas de structures linéaires, il faut disposer de caractéristiques géométriques identifiables et cohérentes sur l'ensemble de leur tracé. Ainsi, une analyse de courbure peut contribuer à repérer des limites de couches géologiques (Kudelski et al., 2009), des crevasses en bord de plaines alluviales (Baruch and Filin, 2011) ou des réseaux de drainage (Bailly et al., 2008). Des techniques d'accumulation de flux ont également été déployées pour identifier des réseaux hydrographiques (Mandlburger et al., 2011). Les pistes forestières ont une empreinte caractéristique dans le MNT qu'il est possible de repérer à l'aide de classifieurs morphologiques (Ferraz et al., 2016). Par ailleurs,

l'organisation en réseau de ces structures peut être prise en compte pour fusionner les tronçons détectés. Le développement récent des réseaux de neurones et des techniques de classification à base d'apprentissage supervisé a contribué à l'émergence de nouveaux détecteurs ne nécessitant pas de modèle spécifique de la structure (Trier et al., 2016, Salberg et al., 2017, Liu et al., 2019). Mais ces outils requièrent en contrepartie une base d'entraînement constituée d'un volume conséquent de données annotées, suffisamment diversifiées pour réduire les biais d'apprentissage. Cette condition n'est pas toujours simple à satisfaire dans le domaine de l'archéologie où souvent, peu d'artefacts sont disponibles. Par ailleurs, le travail d'annotation peut prendre beaucoup de temps. Ces solutions sont cependant sujettes aux erreurs d'interpolation inhérentes au MNT.

Beaucoup moins d'approches ont tenté d'exploiter directement les nuages épars de points 3D. En particulier, celles basées sur l'analyse de profils produisent une bonne efficacité en temps d'exécution. Initialement appliquées à l'analyse de scènes industrielles (Jiang and Bunke, 1994) ou d'environnement urbains (Sithole and Vosselman, 2006, Clode et al., 2007) composés de formes bien régulières, elles ont plus récemment été mises en œuvre pour extraire des réseaux de pistes forestières (David et al., 2009) ou de fossés de drainage (Roelens et al., 2018). En complément, l'information radiométrique du LiDAR peut contribuer à identifier des surfaces inondées ou humides (Roelens et al., 2018), le bitume de routes (Clode et al., 2007) ou encore le revêtement de pistes bien distinct des côtés enherbés (David et al., 2009). Mais cette exploitation du signal d'intensité reste délicate car elle dépend fortement du contexte ambiant et requiert un étalonnage compliqué en pratique. Dans ce contexte, l'analyse de profils altimétriques basée sur des outils de géométrie discrète apparaît comme une nouvelle voie à explorer compte tenu de l'efficacité et de l'absence d'approximation des algorithmes de traitement proposés.

3. LES DONNÉES LIDAR

L'acquisition LiDAR a été réalisée en décembre 2018. Tout le massif du Fossard a été couvert entre les vallées de la Cleurie, de la Moselotte, de la Moselle et de la Vologne, et la route reliant Docelles au Tholy sur la partie nord-est. Le capteur utilisé est de type Titan DW. Il échantillonne un signal à longueur d'onde pleine, avec une fréquence d'émission de 300 impulsions par seconde et une fréquence de balayage de 37 Hz. L'avion a effectué des allers-retours à la vitesse de 58 m/s à une altitude de 1150 m, au dessus d'un relief variant entre 360 m dans la vallée de la Moselle et 819 m au point le plus élevé. Compte tenu de l'amplitude de balayage fixée à $\pm 21^o$, l'espacement d'environ 200 m entre les trajectoires a permis d'obtenir un recouvrement de 50% des sillons.

Les données produites comportent 611 dalles de 500×500 m^2 couvrant une superficie de 133 km^2 avec une densité de 10,3 points de sol par m^2. La partie montagneuse comporte 313 dalles, soient 78,25 km^2 avec une densité de 9,65 points de sol par m^2, le reste correspondant à des secteurs de plaine ou à des zones urbanisées (fig. 2). Pour l'extraction interactive, l'étude s'est focalisée sur le secteur sud, représentant 92 dalles, soient 23 km^2, avec une densité de 7,9 points de sol par m^2. Un ensemble de points classifiés stockés au format LAS 1.3 et un MNT de résolution 1000×1000 pixels est fourni avec chaque dalle.

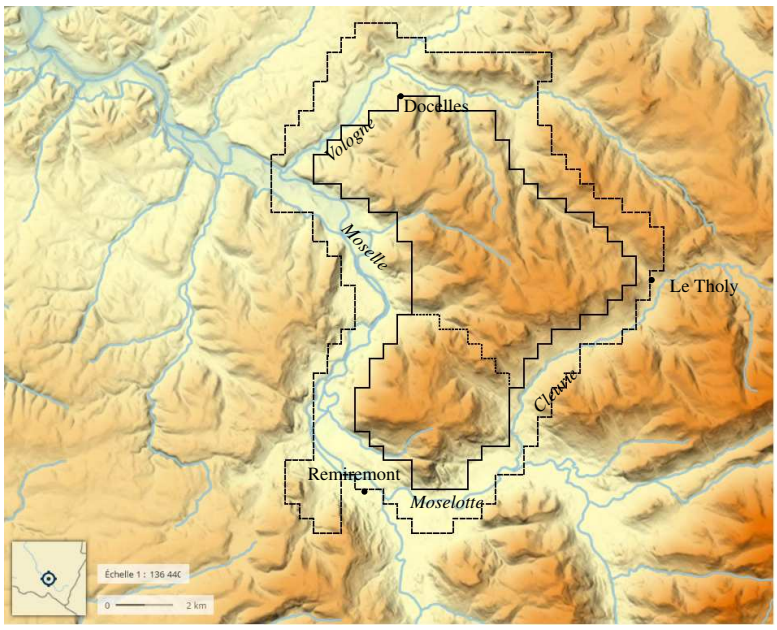

Figure 2. Emprise du LiDAR du Fossard: limite du dallage en tiretés, secteur montagneux en plein, limite de la portion sud en pointillés; fond d'image : Geoportail.

Une analyse détaillée de la répartition des points montre une densité très hétérogène (fig. 3). Les secteurs fortement couverts en points de sol côtoient des secteurs très pauvres essentiellement liés à la présence de plantations7 serrées de résineux ou bien à un couvert de végétation basse ayant pu subsister au moment de la campagne d'acquisition. C'est un contexte particulièrement difficile pour la détection automatique de structures, et de ce point de vue, les données LiDAR du Fossard constituent un excellent test de robustesse des algorithmes.

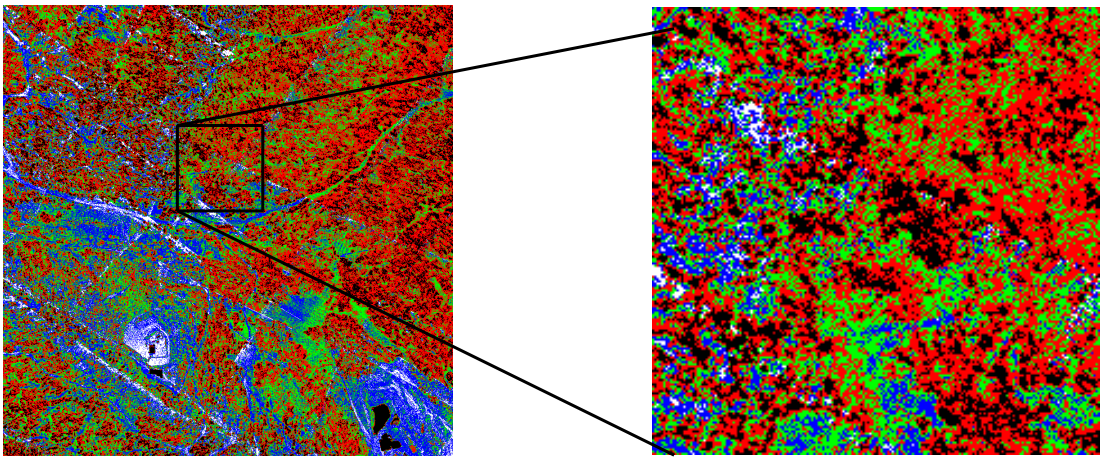

Figure 3. Carte de densité dans un secteur de 1 km^2 aux abords du Saint-Mont. Résolution : 1 m^2, noir : pas de point, rouge : de 1 à 7 points, vert : de 8 à 15 points, bleu : de 16 à 31 points, blanc : au moins 32 points.

4. NOTIONS DE GÉOMÉTRIE DISCRÈTE UTILISÉES

La géométrie discrète est une discipline récente liée au développement des données numériques. Elle a pour objet d'apporter un cadre mathématique rigoureux au traitement géométrique de ce type de données (Chassery and Montanvert, 1991, Klette and Rosenfeld, 2004, Coeurjolly et al., 2007). Les principales avancées escomptées dans le cadre de ce projet sont d'une part la mise à profit d'algorithmes efficaces, bien adaptés au cadre discret, et d'autre part le bon contrôle de l'application et la réplicabilité des résultats compte tenu de l'absence d'approximations faites dans les traitements. Dans cette partie, nous présentons sommairement les principales notions utilisées dans le cadre du projet.

4.1 Droites discrètes

Le principal outil sur lequel repose ce travail est la notion de droite discrète. Dans un plan discret composé de points à coordonnées entières dans $\mathbb{Z}^2$, une **droite discrète** $\mathcal{L}(a, b, c, \nu)$ est l'ensemble de points $P(x, y)$ satisfaisant la double inégalité :

$$0 \leq ax + by - c < \nu, \text{ avec } (a, b, c, \nu) \in \mathbb{Z}^4 \tag{1}$$

Cet ensemble de points est borné par les deux droites d'appui $ax + by = c$ et $ax + by = c + \nu - 1$. Il forme un motif périodique de longueur $p(\mathcal{L}) = max(|a|, |b|)$ (fig. 4). Les paramètres a et b contrôlent la pente de la droite au travers du vecteur directeur $\vec{V}(\mathcal{L}) = (-b, a)$. Le paramètre ν contrôle son épaisseur et le paramètre c son décalage à l'origine. $p(\mathcal{L})$ est la plus petite valeur de ν pour laquelle $\mathcal{L}$ reste connexe: pour tout point, il existe deux autres points de la droite appartenant à ses huit voisins. On dit alors que cette droite est une **droite naïve**.

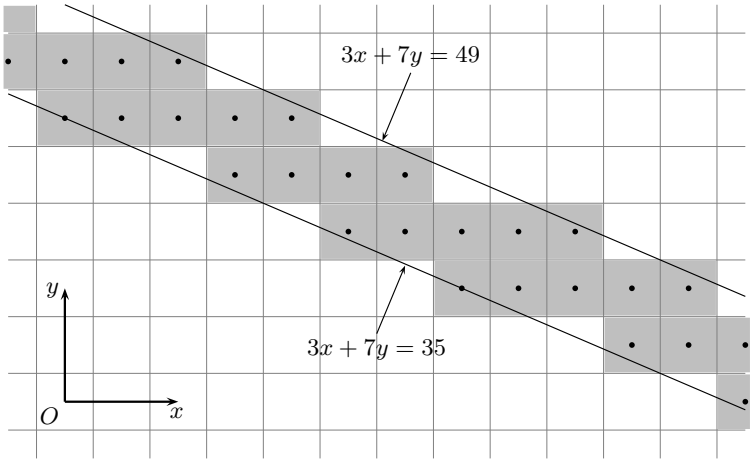

Figure 4. La droite discrète $\mathcal{L}(3, 7, 35, 49)$. Dans le cas d'une image composée d'une grille de pixels, les points de la droite sont les centres des pixels constituant la numérisation de la droite.

L'**épaisseur** de la droite $E(\mathcal{L}) = \frac{\nu}{max(|a|,|b|)}$ est la plus petite distance verticale ou horizontale entre les deux droites $ax + by = c$ et $ax + by = c + \nu$.

4.2 Scans directionnels

L'approche retenue pour détecter des structures linéaires est basée sur l'analyse de profils transversaux à la structure. Pour cela, nous utilisons la notion de scan directionnel.

Un **scan directionnel** (Kerautret and Even, 2009) est une partition ordonnée d'une droite discrète épaisse $\mathcal{D}$ par un ensemble de droites naïves $\mathcal{N}_i$ orthogonales à $\mathcal{D}$, restreinte à une grille $\mathcal{G}$ dans $\mathbb{Z}^2$. $\mathcal{D}$ est appelée une **bande de scan**, $\mathcal{N}_i$ une **ligne de scan**, et chaque élément de la partition $S_i = \mathcal{D} \cap \mathcal{N}_i$ est un **segment de scan** ou plus simplement un **scan**.

Les scans S_i sont définis de part et d'autre d'un scan initial S_0, et indexés en fonction de leur distance au scan initial avec un signe positif (resp. négatif) s'ils sont à sa droite (resp. à sa gauche) (fig. 5 gauche). La bande de scan est parcourue de façon incrémentale, depuis le scan initial vers chaque extrémité. Des algorithmes efficaces, basés sur l'exploitation du motif constituant la ligne de scan, garantissent que chaque pixel de la bande appartient à un scan, et un seul.

Dans notre approche interactive, le scan initial est défini par l'utilisateur, sous la forme d'un trait sur la vue du MNT en travers de la structure à extraire. Ce tracé approximatif ne peut pas refléter précisément la direction de la structure dans l'image. Il en découle qu'en s'éloignant du scan initial, la structure échappe de la bande de scan. Par ailleurs, les structures à détecter ne sont pas nécessairement rectilignes. Il faudrait donc régulièrement relancer un nouveau scan pour prolonger l'extraction, avec un surcoût induit par la gestion des intersections entre éléments consécutifs. Une amélioration de ce scan directionnel statique a donc été développée pour permettre un suivi de la structure sur de plus longues distances : c'est la notion de scan directionnel adaptatif.

Un **scan directionnel adaptatif** (Even et al., 2019) est une version dynamique du scan directionnel, asservie sur une courbe $\mathcal{C}$. Par rapport au scan directionnel standard où la bande de scan est fixe, à chaque étape d'un scan directionnel adaptatif, la bande de scan est centrée sur la courbe à suivre, les lignes de scan et la longueur des segments de scan restant fixes (fig. 5 droite).

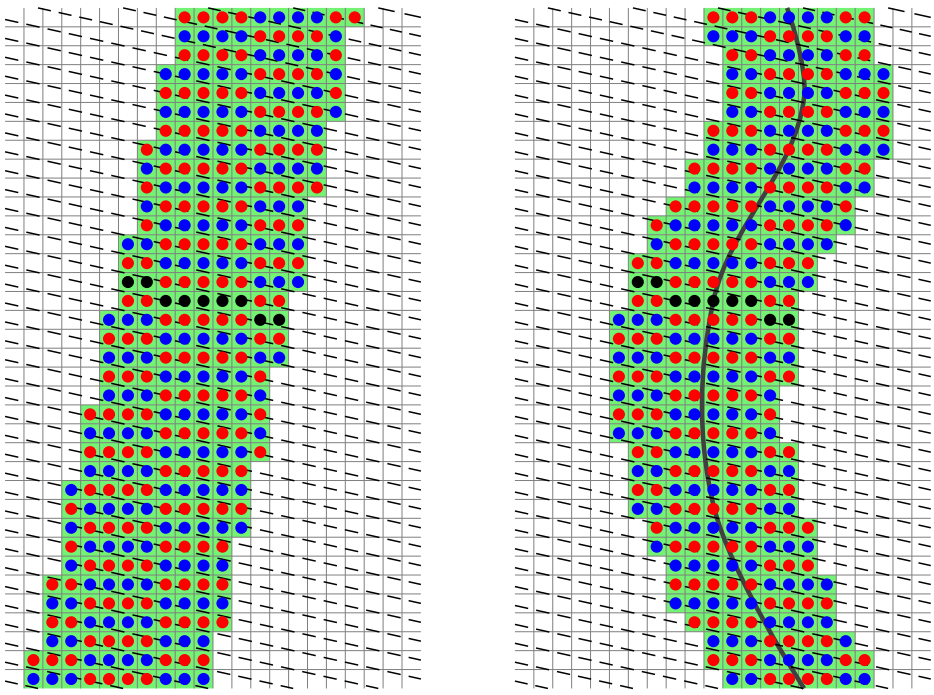

Figure 5. A gauche, un scan directionnel : grille $\mathcal{G}$ en pointillés, scan initial S_0 en noir, scans impairs en rouge, scans pairs en bleu, limites des lignes de scan $\mathcal{N}_i$ en tiretés et bande de scan $\mathcal{D}$ en vert; à droite, un scan directionnel adaptatif : la bande de scan est continûment centrée sur la position de la courbe $\mathcal{C}$, et les scans se décalent pour couvrir la courbe.

Ce contrôle de la direction des scans permet une meilleure analyse de la structure par mise en correspondance d'un modèle de profil transversal sur les points collectés au niveau de chaque scan.

4.3 Construction de profils de points

Les points des données LiDAR sont organisés à l'intérieur de dalles d'étendue 500×500 m^2 couvrant toute la zone d'acquisition. Les points classés "sol" sont extraits et plongés à l'intérieur d'une grille calée sur celle du MNT pour offrir un accès rapide aux points correspondant à chaque pixel de l'image du MNT. Pour chaque scan à traiter, les points de sol correspondants sont collectés et classés dans la direction du scan pour former un profil altimétrique (fig. 6). Afin de réduire les disparités de distribution des points le long du profil, liées à l'effet numérique de paliers, une grille 5 fois plus fine de résolution 0.1 m est utilisée pour ranger les points de sol. Pour chaque scan de MNT, on collecte donc les points dans 5 scans adjacents de cette grille à haute résolution.

Les profils altimétriques obtenus sont alors plongés dans une grille millimétrique pour pouvoir les traiter par les outils de géométrie discrète. Les coordonnées des points sont arrondies au millimètre près, en cohérence avec la précision du LiDAR.

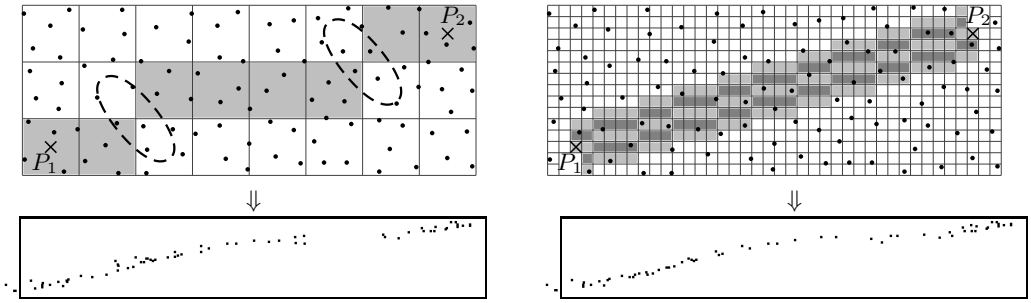

Figure 6. Extraction d'un profil altimétrique de points de sol dans une grille de même résolution que le MNT (à gauche) et de résolution 5 fois plus fine (à droite). Les profils altimétriques collectés sont affichés en bas.

4.4 Segments flous

La notion de droite discrète ne suffit pas pour détecter des structures linéaires dans les profils altimétriques, en raison des irrégularités des surfaces à traiter. Il est nécessaire pour cela de les assortir d'une tolérance en épaisseur pour absorber ces imperfections. A cet effet, nous utilisons une notion mieux adaptée à la nature des formes à reconnaître : les segments flous.

Un **segment flou** $\mathcal{B}$ d'épaisseur ε est un sous-ensemble d'une droite discrète $\mathcal{L}$ d'épaisseur $E(\mathcal{L}) = \varepsilon$ (fig. 7). $\mathcal{L}$ est une **droite couvrante** de $\mathcal{B}$. La **droite optimale** de $\mathcal{B}$ est sa droite couvrante de plus petite épaisseur. L'**épaisseur** du segment flou est l'épaisseur de sa droite optimale.

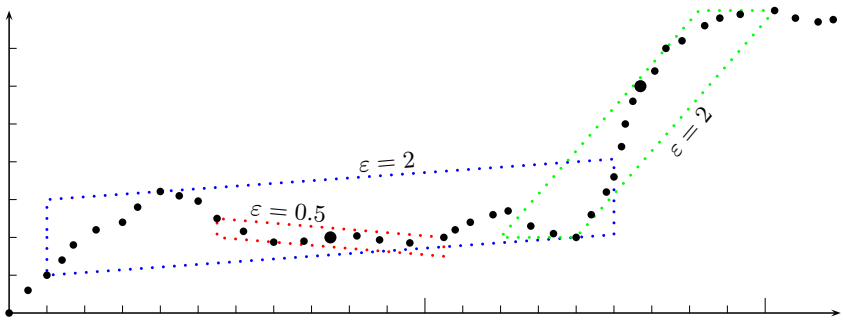

Figure 7. Trois segments flous de différentes épaisseurs; les disques plus larges correspondent aux points de départ de l'algorithme de reconnaissance.

Un algorithme efficace de reconnaissance de segment flou dans un ensemble de points (Debled-Rennesson et al., 2006) est utilisé. Il repose sur un maintien de l'enveloppe convexe du segment flou. Il fonctionne de façon incrémentale: les points sont ordonnés selon une direction du plan, chaque point de l'ensemble est testé dans l'ordre en partant d'un point initial quelconque vers les points extrêmes. Une valeur maximale d'épaisseur ε_0 est assignée au segment flou lors de sa création. Pour chaque point testé, l'algorithme vérifie si le nouvel ensemble est toujours un segment flou d'épaisseur ε_0 avant de valider l'ajout.

Cet algorithme a toutefois deux inconvénients illustrés sur la fig. 7. Il n'estime pas de valeur optimale d'épaisseur, et le résultat dépend du point de départ choisi. En l'état, il n'est pas bien adapté à la recherche d'une séquence linéaire dans un profil altimétrique, car il intègre aussi des points en dehors de la séquence tant qu'ils tiennent à l'intérieur de l'épaisseur initialement fixée.

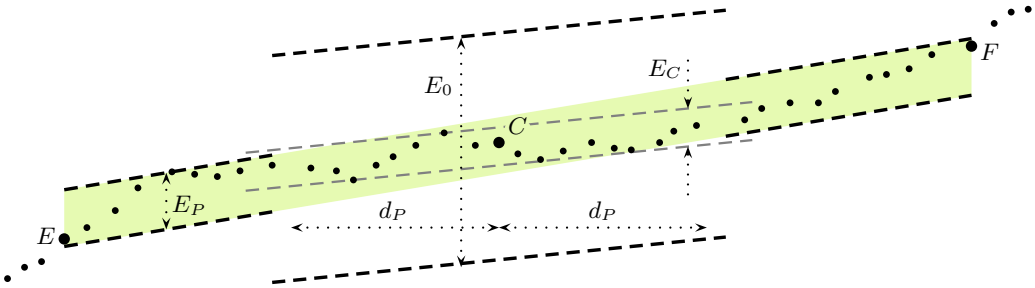

Figure 8. Procédure de pincement du segment flou.

Une amélioration de l'algorithme a donc été réalisée au travers d'une procédure de pincement (Even et al., 2019) (fig. 8). Au départ, l'épaisseur maximale assignée E_0 est réglée large pour absorber de fortes variations de la structure. Quand l'extension du segment atteint une distance d'observation d_P à partir de laquelle on estime que l'on a suffisamment d'information pour estimer les fluctuations de la surface, l'épaisseur maximale assignée est ramenée à une valeur E_P correspondant à l'épaisseur effective E_C

du segment flou, augmentée d'une marge de sécurité ε_P pour tenir compte de possibles irrégularités, et surtout de son orientation encore incomplètement déterminée à ce stade. Cette procédure garantit une meilleure détermination de la structure sous-jacente, et en particulier de son orientation et de ses extrémités E et F.

5. EXTRACTION DE STRUCTURES LINÉAIRES

A partir de ces outils de géométrie discrète, un outil interactif d'extraction de structures linéaires de données LiDAR a été développé. Le principe repose sur la sélection manuelle d'une structure repérée sur une vue du MNT. L'utilisateur trace un trait en travers de la structure. Un traitement est instantanément lancé au niveau de ce segment initial pour extraire la structure basé dans le nuage de points de sol. Le résultat est affiché sur la vue du MNT.

L'outil permet l'extraction de plusieurs types de structures : des pistes forestières, des structures en élévation aussi nommées crêtes, et des structures en creux. Pour chacune d'elles, un modèle de profil est utilisé pour la détection. Toutefois, c'est le même algorithme principal d'extraction qui est employé pour toutes ces structures. Nous commencerons donc par sa présentation.

5.1 Algorithme principal d'extraction

L'algorithme principal d'extraction d'une structure procède en deux étapes : une étape de détection initiale d'un premier profil, suivie en cas de succès d'une étape d'extension sur les deux côtés (fig. 9).

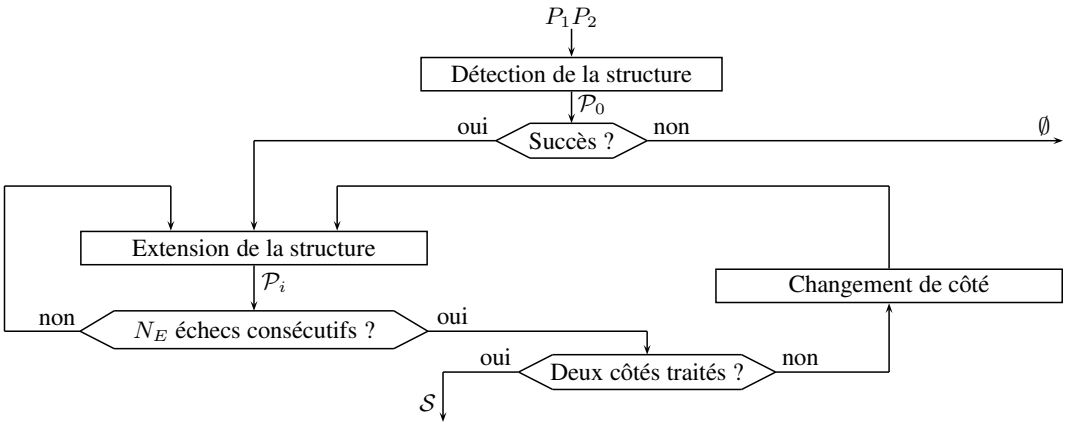

Figure 9. Schéma de fonctionnement de l'algorithme d'extraction.

Dans l'étape de détection initiale, un scan directionnel adaptatif est créé à partir du segment tracé P_1P_2, et un profil altimétrique est extrait du premier scan. Ce profil est comparé au modèle de la structure et en cas de succès, une coupe initiale $\mathcal{P}_0$ est produite, et fournit une première instance de la structure $\mathcal{S}$.

La structure est ensuite étendue itérativement de chaque côté du premier scan. A chaque itération, un profil altimétrique extrait du scan suivant est comparé au modèle pour produire la coupe suivante $\mathcal{P}_i$. L'écart avec la coupe précédente $\mathcal{P}_{i-1}$ permet de vérifier sa cohérence spatiale. En cas de succès, elle est ajoutée à la structure $\mathcal{S}$. Le processus s'arrête suite à N_E échecs consécutifs. La valeur de ce paramètre N_E est réglable pour franchir de courtes interruptions de validité du modèle pouvant correspondre par exemple à une intersection entre pistes, à une tranchée dans une structure en élévation, ou à un comblement de structure en creux.

En cas d'un nombre trop faible de points dans un profil altimétrique, ce profil n'est pas traité et on passe directement au scan suivant sans incrémenter le nombre d'échecs. Cette condition permet le franchissement de zones à très faible densité de points, sous réserve de retrouver la structure de l'autre côté de la zone. Si un changement de direction important de la structure survient entre-temps, l'extension est alors stoppée.

Cet algorithme est adapté à différents types de structures linéaires. Seulement les fonctions de détection dans les profils altimétriques diffèrent, exploitant un modèle de coupe transversale spécifique. Ces modèles sont présentés à la suite.

5.2 Détection des pistes forestières

Un modèle adapté au contexte montagneux a été retenu pour représenter une coupe transversale de piste (Ferraz et al., 2016) : un plateau quasi-horizontal encadré par des bords pentus (fig. 10). Il convient car les pistes sont généralement perpendiculaires à la ligne de pente, pour éviter de trop fortes déclivités. Dans les quelques zones plates, un léger décalage par rapport au relief local ou la présence de fossés peut suffire à sa détection, sous réserve d'avoir suffisamment de points au sol.

Dans la présente approche, le plateau est représenté par un segment flou dont la longueur L_P, l'épaisseur E_P et l'inclinaison β_P ne peuvent excéder des seuils prédéfinis. Pour les pistes du Fossard, ces paramètres ont été fixés à $2m \leq L_P \leq 6m$, $E_P \leq 0,25m$ et $\beta_P \leq 6^o$.

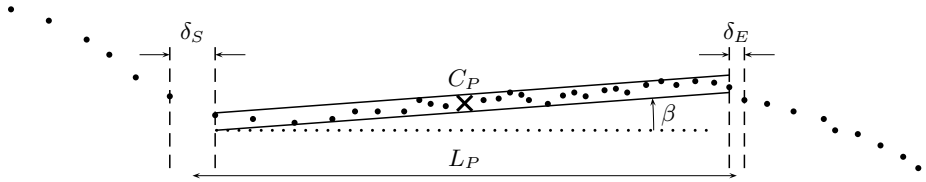

Figure 10. Modèle de coupe d'une piste forestière : les paramètres sont la largeur L_P et la position du centre C_P; les intervalles δ_S et δ_E indiquent la précision de la détermination des bords.

La détection du plateau revient à la reconnaissance d'un segment flou enrichie de la procédure de pincement pour déterminer les bords le plus finement possible. En raison de l'éparpillement des points de sol, ces bords ne peuvent être déterminés qu'à l'intérieur d'un intervalle entre le dernier point du segment flou et le premier point en dehors. Les bords sont considérés comme détectés si cet intervalle n'excède pas un seuil de largeur, ici fixé à $\delta_{max} = 0.5m$. Quand les deux bords sont détectés, la coupe est considérée valide et son centre peut être estimé. Dans le cas contraire, la position du centre est interpolée entre les deux coupes valides les plus proches. Quand le plateau est trop large, mais qu'au moins un des bords est finement détecté, ce bord est utilisé pour localiser la piste.

Les paramètres du modèle utilisés pour vérifier la cohérence spatiale d'une coupe transversale de la piste à la coupe suivante sont :

- la hauteur H_P du centre du plateau,
- la position C_P du centre du plateau selon la direction P_1P_2,
- la largeur L_P de la piste si les deux bords sont identifiés.

Des valeurs d'écart maximales sont choisies pour chacun de ces paramètres en fonction du type de piste à extraire. Entre deux coupes consécutives, l'écart en hauteur fournit une indication locale sur la pente de la piste et l'écart en position sur son orientation. Les tests réalisés ont montré que la dérive en largeur est plus bruitée, et il est recommandé de fixer une valeur de tolérance plus forte sur la variation de ce paramètre.

5.3 Détection des structures en élévation ou en creux

La coupe transversale d'une structure en élévation se repère par une proéminence par rapport au relief local. On peut l'approximer par un triangle. Une représentation naïve consisterait à choisir comme sommet le point le plus haut dans le profil altimétrique, et d'appuyer la base sur deux minima locaux de part et d'autre (fig. 11a). Mais rien ne garantit que le point haut du profil convienne, par exemple quand la structure est perpendiculaire à la pente et que l'érosion a comblé son bord haut (fig. 11b). L'existence de minima locaux n'est pas garantie non plus, par exemple quand la structure s'appuie sur une rupture de pente du terrain (fig. 11c).

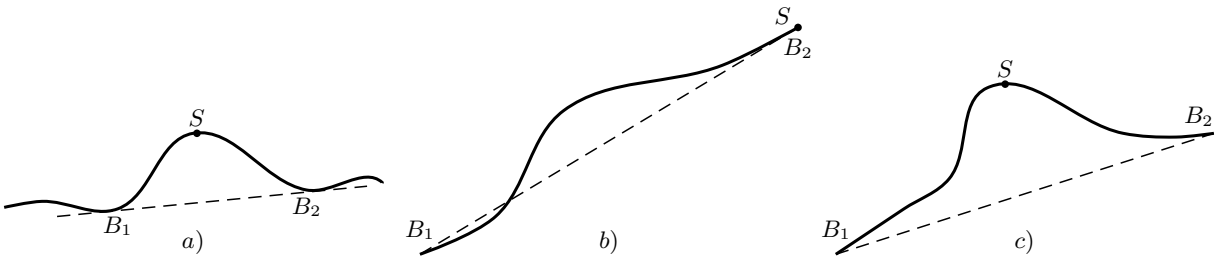

Figure 11. Représentation naïve d'une coupe de crête : (a) cas favorable; (b) cas défavorable où le point le plus élevé S est en dehors de la structure, (c) cas défavorable où les points bas B_1 et B_2 ne délimitent pas correctement la structure.

Pour affiner ce modèle, on détermine le relief local de part et d'autre du profil altimétrique en l'approximant par deux segments flous : $\mathcal{R}_1$ borné par les points E_1 et F_1 et $\mathcal{R}_2$ par les points E_2 et F_2. On ne considère ensuite que la ligne polygonale $\mathcal{P}$ joignant les points du profil altimétrique situés entre F_1 et F_2. Le sommet est alors le point le plus éloigné de cette ligne. Si l'un des reliefs locaux n'est pas détecté, par exemple à cause d'un terrain perturbé ou d'un nombre insuffisant de points de sol, la solution par défaut est de ramener le point F_1, ou F_2 selon le cas, à l'extrémité de la séquence de points. Dans ce cas défavorable, le profil n'est pas validé, et ne peut pas être pris en compte pour l'estimation de grandeurs géométriques.

Le modèle de la coupe transversale d'une crête (fig. 12) est construit de la façon suivante. On détermine séquentiellement :

1. la ligne de pente F_1F_2,
2. le sommet S, point le plus élevé dans la direction orthogonale à la ligne de pente,
3. la base $\mathcal{B} = B_1B_2$, segment de l'enveloppe convexe de la ligne $\mathcal{P}$ situé à l'aplomb du sommet S,
4. la droite $\mathcal{C}_V$ orthogonale à la base $\mathcal{B}$, coupant le polygone $\mathcal{A}$ clos par $\mathcal{P}$ et $\mathcal{B}$ en deux parties d'aires égales,

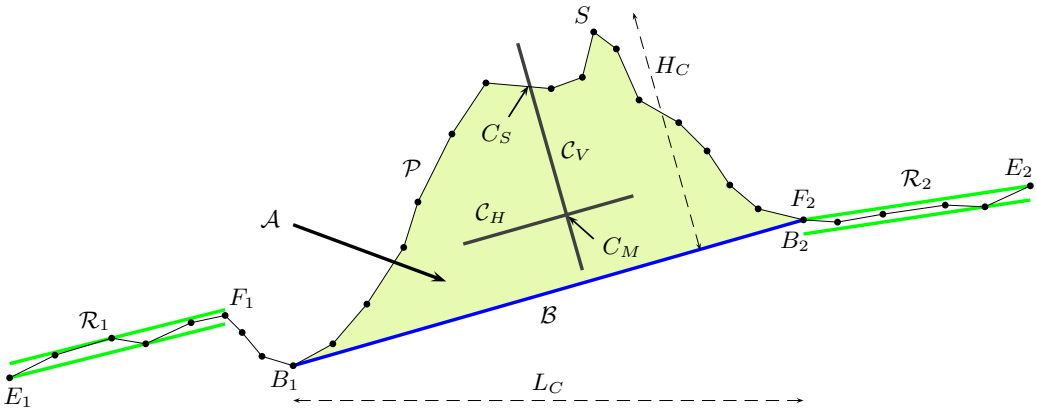

Figure 12. Modèle de coupe d'une crête : les paramètres sont la largeur L_C, la hauteur H_C, et soit le centre de surface C_S, soit le centre de masse C_M.

5. le centre de surface C_S à l'intersection de $\mathcal{C}_V$ et de $\mathcal{P}$,
6. la droite $\mathcal{C}_H$ parallèle à la base $\mathcal{B}$, coupant le polygone $\mathcal{A}$ en deux parties d'aires égales,
7. et le centre de masse C_M à l'intersection de $\mathcal{C}_V$ et de $\mathcal{C}_H$.

Les paramètres servant à vérifier la cohérence spatiale sont :

- la hauteur et la position dans l'axe P_1P_2 du centre de masse C_M ou du centre de surface C_S selon le cas,
- la hauteur H_C de la crête, hauteur du sommet S à la base,
- sa largeur L_C, distance horizontale entre F_1 et F_2.

Le choix de ces paramètres est très dépendant du type de structure à extraire. En particulier, le centre de masse est souvent plus stable que le centre de surface quand la structure est soumise à des perturbations naturelles. La détection du relief local de part et d'autre de la structure offre une détection plus fine permettant d'effectuer des mesures de largeur, de hauteur, ou même d'aire de la section, et donc de volume de la structure quand on intègre sur plusieurs coupes.

Une structure en creux peut être détectée à partir de la même construction en appliquant juste une symétrie par rapport à la base. Par contre, le choix entre ces deux types de structures doit être précisé par l'utilisateur, car il est difficile de le déterminer automatiquement. En effet, comme sur l'exemple des schémas de la fig. 11, le bord d'une structure en élévation peut souvent être interprété comme une structure en creux.

5.4 Implantation dans le logiciel ILSD

L'algorithme d'extraction a été intégré dans un outil logiciel, nommé ILSD (pour *Interactive Linear Structure Detector*), et diffusé sous licence libre GNU GPL pour une large diffusion. L'exécutable et les sources sont librement accessibles sur un dépôt GitHub public : `https://github.com/evenp/ILSD.git`.

L'objectif de ce logiciel est de permettre de recueillir des retours d'utilisateurs en vue d'améliorer son paramétrage, et à plus long terme, de faciliter son intégration dans un SIG. A cet effet, il a été développé à partir de bibliothèques multi-plateformes, reconnues par les principaux systèmes d'exploitation, Windows, Mac et Linux, et doté d'une interface aisément appropriable par des utilisateurs non nécessairement experts en informatique.

6. VALIDATIONS EXPÉRIMENTALES

Les premiers tests de l'approche (Even and Ngo, 2020) ont montré que des structures linéaires de plusieurs centaines de mètres de long sont extraites en une fraction de seconde, pour un résultat visuellement plausible. Dans l'exemple de la figure 13, un tronçon de 549 m est extrait en 123.2 ms sur une architecture matérielle standard (un ordinateur portable avec processeur Intel© Core™ i5 à fréquence de 1.90 GHz.)

Ce niveau de performance en fait un outil potentiellement exploitable dans un cadre interactif. L'utilisateur trace un trait sur la vue du MNT en travers du tracé présumé de la structure, et le résultat de l'extraction apparaît immédiatement. En cas de mauvaise détection, par exemple si les conditions initiales ne sont pas satisfaisantes en raison d'un nombre insuffisant de points dans le profil initial, il peut alors reprendre son trait pour trouver une zone plus favorable.

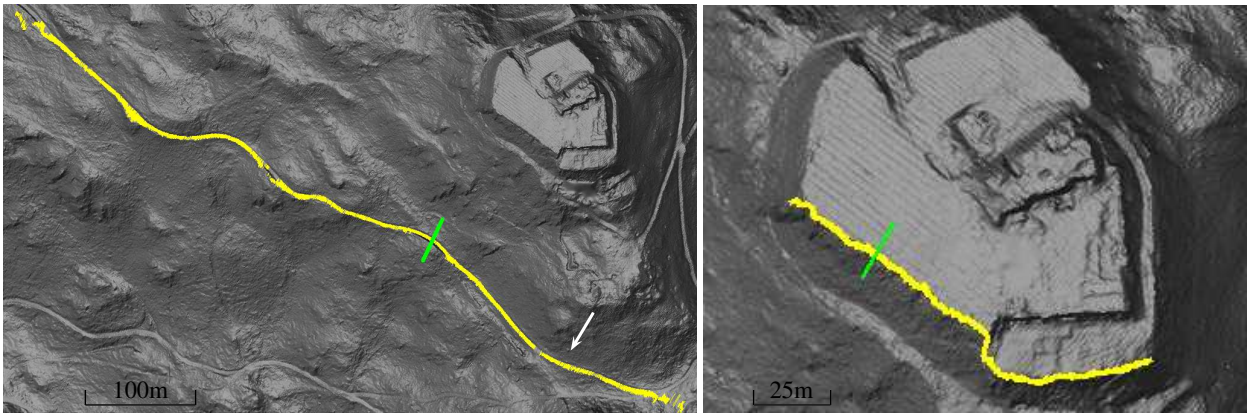

Figure 13. Extraction interactive de structure linéaire à partir d'un seul trait initial (en vert) : à gauche, une piste forestière; la flèche signale un secteur avec très peu de points au sol; à droite, une crête.

6.1 Evaluation de l'extraction interactive des pistes

Pour évaluer la qualité de l'extraction, des tests ont été menés sur un ensemble de pistes forestières (Even and Ngo, 2020) pour lesquelles, une vérité de terrain a pu être constituée à partir de numérisations manuelles de la ligne centrale de chaque piste. Cette approche permet de disposer d'un tracé suffisamment précis des pistes (White et al., 2010). Cette vérité de terrain comporte la localisation de la piste, mais sa largeur reste indéterminée. Une largeur de 5 m a été arbitrairement associée aux quelques pistes larges (probablement des pistes calibrées pour la circulation des grumiers), 3 m pour les autres constituant une large majorité. La carte binaire obtenue peut alors être comparée avec celle issue de l'extraction interactive (fig. 14).

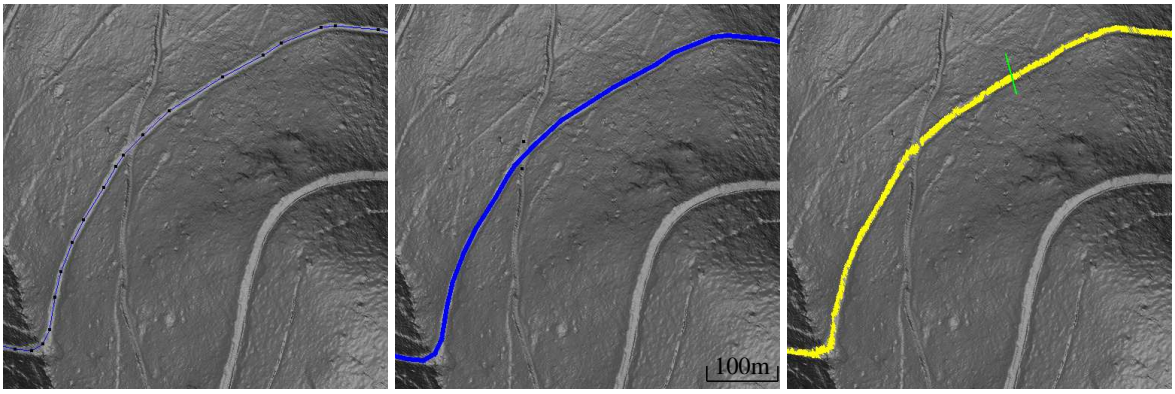

Figure 14. Vérité de terrain et extraction supervisée : à gauche, numérisation de la ligne centrale sur le MNT; au centre, épaississement à 3 m avec 2 points d'arrêt au niveau d'une bifurcation; à droite, piste extraite à partir du scan initial vert.

Trois secteurs étendus de 1500 $\times$ 1500 m^2 ont été retenus : Saint-Mont, Le Sapé et Blancs-Murgers. Pour obtenir une base de comparaison identique, des points d'arrêt ont été disposés au niveau des extrémités des pistes retenues et au niveau des bifurcations avec des pistes exclues. Ces points d'arrêt sont pris en compte pour interrompre l'extension de la piste. Tous les paramètres d'extraction ont été établis en phase de préparation, et n'ont pas été modifiés pendant toute la durée des tests sur les trois secteurs. La figure 15 montre le résultat de l'extraction sur une partie de l'un des trois secteurs.

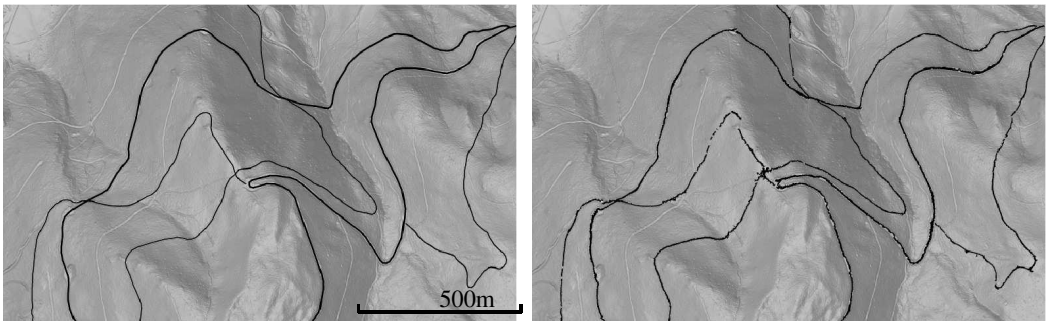

Figure 15. Extraction interactive de pistes forestières sur le secteur Blancs-Murgers; à gauche, les pistes numérisées; à droite, les pistes obtenues par l'extraction interactive.

Les résultats reportés (fig. 16) comportent pour les trois secteurs, la longueur cumulée L de pistes numérisées, le nombre N de

tracés manuels effectués pour lancer l'extraction, et trois mesures de qualité : la précision P est le rapport entre la surface de pistes correctement extraites et la surface de pistes effectivement extraites, la couverture C est le rapport entre la surface de pistes correctement extraites et la surface de pistes numérisées, et la mesure F est la moyenne harmonique entre ces deux grandeurs.

Secteur	D (pts/m^2)	L (m)	N	P (%)	C (%)	F (%)
St-Mont	10.0	6322	71	75.10	84.50	79.52
Blancs-Murgers	7.0	11001	128	75.17	80.88	77.92
Le Sapé	6.5	5995	52	75.50	79.25	77.33

Figure 16. Performances de l'extraction de pistes sur trois secteurs de la partie sud du Fossard.

6.2 Application à la détermination de murs anciens

L'évaluation de l'outil pour l'extraction de structures linéaires en élévation ou en creux est beaucoup plus délicate que pour celle des pistes forestières. En effet, la géométrie de ces structures est beaucoup plus variée et souvent plus diffuse. Elles peuvent être soumises à de fortes fluctuations au long de leur cheminement. Il est alors difficile d'établir une vérité de terrain pour établir des mesures objectives de qualité. Nous avons cependant effectué des tests d'utilisabilité d'ILSD sur deux exemples applicatifs concrets : la détermination de murs anciens, et l'étude de chemins creux.

L'outil a été testé par des archéologues sur la détermination de plusieurs structures linéaires (Even et al., 2021). Il s'agit en l'occurrence de vestiges d'un système de murs d'enceinte érigé autour du Saint-Mont au Haut Moyen-Age (VIe-VIIe s.). Actuellement en partie effondrés et à peine visible dans la végétation basse (fig. 17), seules quelques portions de mur ont été dégagées et étudiées (Grzesznik, 2020), d'autres restent encore à localiser.

Figure 17. Anciens murs d'enceinte du Saint-Mont : à gauche, une partie dégagée et à droite, une section encore enfouie.

Suite à une courte formation sur ILSD, les archéologues ont testé son potentiel sur des portions de murs déjà bien connues. L'une de ces structures a pu être extraite correctement sur 80% de sa longueur à partir d'un seul tracé manuel sur le MNT (fig. 18), bien qu'elle soit coupée par une piste récente et qu'elle repose en partie sur le bord d'une plate-forme naturelle. Une autre structure située en terrain découvert, donc dans une zone dense en points de sol, mais de dimensions plus réduites (0.4m de largeur pour 0.1m de hauteur), a demandé un travail plus conséquent de paramétrage de l'outil compte tenu d'un contexte géométrique très différent. Toutefois, en modifiant seulement le nombre maximal d'échecs consécutifs de détection dans les profils, ce paramétrage a permis d'extraire du premier coup une portion encore non identifiée de la structure sur une distance de 150 m dans un secteur pentu et très densément peuplé de conifères. L'analyse des coupes transversales a clairement fait ressortir une rupture de pente dont l'origine n'est probablement pas naturelle. Le tracé extrait correspond à une extension plausible de l'enceinte principale.

6.3 Application à l'étude de chemins creux

Nombre de chemins creux liés aux activités humaines anciennes sillonnent les pentes du Fossard, en particulier, dans les secteurs boisés. Entre autres, le débardage s'effectuant traditionnellement à la *schlitte* (Garnier, 2004, Gebhardt, 2008) a pu contribuer à la formation d'impressionnants réseaux de structures entrelacées. La formation de ces chemins creux s'est accompagnée de phases successives d'érosion du sol au niveau des ruptures de pente, dès que celle-ci dépasse 2 à 4 % (Boardman, 2013, De Geeter et al., 2020). ILSD a été utilisé dans le cadre d'une étude du tracé de plusieurs séries de chemins creux liés à différents types d'activités (Even et al., 2021). L'analyse des coupes longitudinales et transversales des structures extraites et des estimations de grandeurs géométriques a permis de corréler l'usage du chemin creux et son contexte local à son encaissement, et de comprendre les raisons de déviations observées localement.

Cinq types de chemins creux ont été choisis pour cette étude :

- un chemin creux isolé sur une pente douce,
- un chemin d'accès à une carrière de pierres,

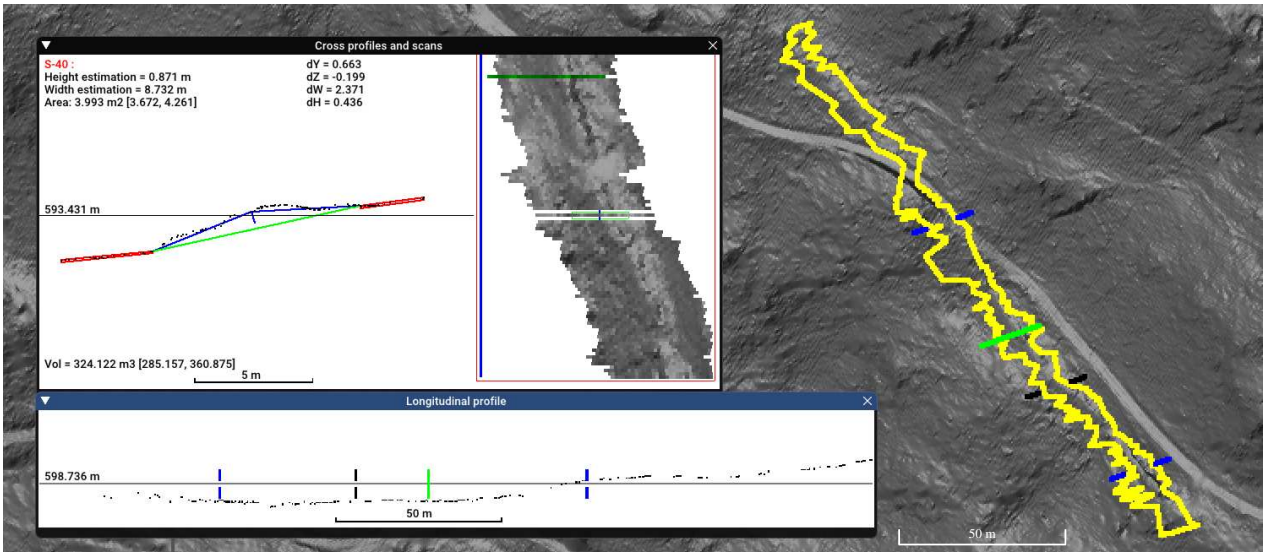

Figure 18. Détection et analyse géométrique d'une portion de mur d'enceinte. L'emprise de la structure détectée est affichée en jaune. Sur le MNT et sur le profil longitudinal de la structure, le trait noir correspond à la coupe transversale analysée et les deux traits bleus à la limite de mesure du volume. Sur le profil transversal, le modèle identifié de la coupe de la structure est tracé en bleu, la base en vert et le relief local de part et d'autre en rouge.

- une série de chemins creux dans un secteur très pentu,
- des drains mécaniques récents avec une faible pente à titre de comparaison,
- un réseau complexe de chemins entrelacés.

La première structure a révélé un changement de caractéristiques de part et d'autre d'une rupture de pente où le chemin est plus encaissé. Dans la partie haute, les profils transversaux ont mis en évidence un rehaussement imprévu du fond de la structure sur un court tronçon de quelques mètres. Des vérifications sur site ont par la suite montré qu'il s'agissait d'un comblement récent pour créer un accès entre deux parcelles. Dans la partie basse moins pentue, une déviation du tracé a pu être expliquée par la proximité d'un chemin construit plus récemment, donnant accès à un ancien champ épierré, actuellement reboisé.

Le chemin de carrière montre une différence importante de volume entre les parties haute et basse, pouvant s'expliquer par un usage plus intensif de la partie basse donnant accès à l'ensemble de la zone de carrière contrairement à la partie haute (fig. 19).

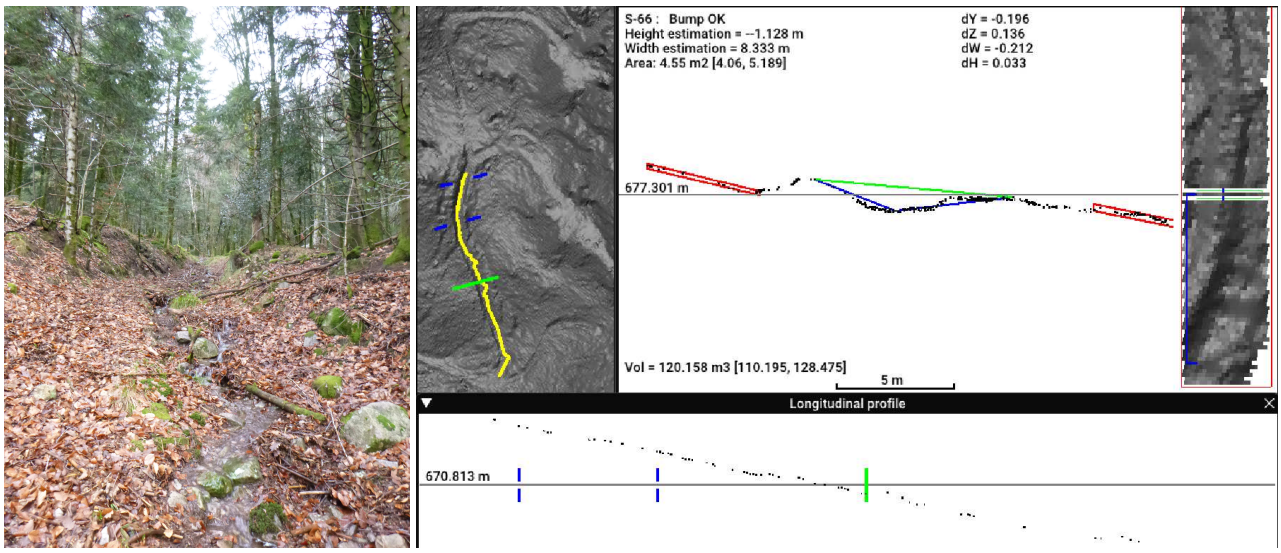

Figure 19. Analyse d'un chemin creux menant à des carrières de pierre.

L'analyse des chemins en forte pente indique un volume d'érosion beaucoup plus homogène, cohérent avec le gradient de pente constant observé à cet endroit. Ces structures peu marquées dénotent des utilisations plus courtes et discontinues. Toutefois, situées dans un secteur de plantations serrées d'épicéas, leur détection s'est avérée plus difficile avec un taux d'échec de détection des profils assez élevé.

L'exemple des drains a montré des caractéristiques conformes à ce qui était attendu, à savoir une faible érosion dans ce secteur à très faible pente.

Enfin, l'étude des structures entrelacées a mis en évidence une érosion importante qui ne peut pas seulement s'expliquer par la pente au vu des profils longitudinaux analysés. Cela révèle un usage vraisemblablement intensif de ces chemins creux. Toutefois, pour bon nombre de ces structures très proches les unes des autres, le relief local fortement perturbé n'a pas été détecté, et les grandeurs géométriques n'ont pas pu être estimées, faute d'une ligne de base suffisamment fiable (fig. 20).

Figure 20. Chemins creux entrelacés : vue du MNT à gauche, photo prise sur site à droite.

7. AUTOMATISATION DE L'EXTRACTION DES PISTES

L'automatisation de l'extraction des pistes (Even and Ngo, 2021) a principalement consisté à remplacer le tracé initial de l'utilisateur par une analyse du MNT pour poser des graines aux endroits les plus favorables. Cette analyse enchaîne quatre opérations :

1. Extraction du gradient de pente inversé du MNT; ce traitement basé sur la composante verticale de la normale à la surface met bien en relief les secteurs horizontaux (White et al., 2010).

2. Application du filtre morphologique RORPO (Merveille et al., 2017); ce filtre rehausse les éléments curvilinéaires dans l'image.

3. Extraction des contours droits avec l'outil FBSD (Even et al., 2019); cet outil rapide englobe le contour détecté dans un segment flou pour s'adapter aux fluctuations du gradient d'image.

4. Placement de graines à intervalles réguliers en travers des segments les plus longs.

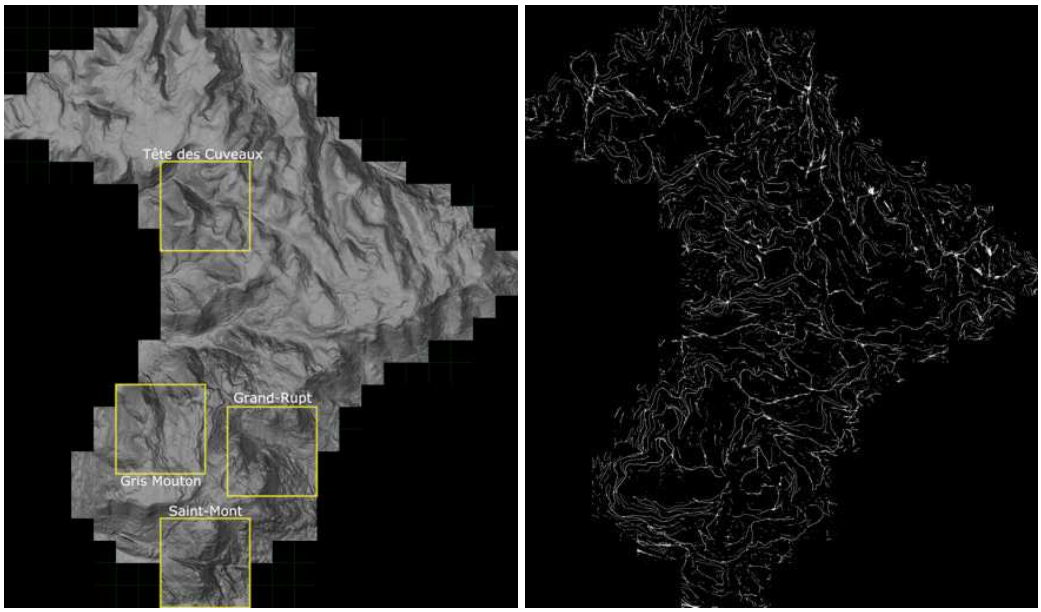

Figure 21. Extraction automatique de pistes : à gauche, les dalles LiDAR testées, avec l'emplacement des 4 secteurs sélectionnés pour évaluer la qualité de l'extraction; à droite, les pistes extraites sur l'ensemble des dalles.

L'algorithme d'extraction est alors lancé à partir de chacune des graines, en testant plusieurs positions décalées le long de la graine et en retenant celle fournissant la meilleure détection initiale du profil de piste. Les graines au niveau des pistes détectées sont

écartées pour éviter la détection multiple de mêmes portions. Pour chacune des deux étapes (sélection des graines, extraction des pistes), les dalles sont traitées par paquets pour éviter l'engorgement de la mémoire de travail.

L'extraction automatique a été testée sur la partie montagneuse du LiDAR du Fossard (313 dalles, 78,25 km^2). L'extraction complète a pris 29 minutes de temps d'exécution : 14 minutes pour la sélection des graines, puis 15 minutes pour l'extraction des pistes. Le résultat est présenté en fig. 21.

Quatre secteurs de 2×2 km^2 ont été sélectionnés pour évaluer la qualité de l'extraction automatique (fig. 21 à gauche). Sur chacun, les pistes principales ont été numérisées manuellement pour constituer une vérité de terrain. Dans ce contexte automatisé, aucun point d'arrêt n'a été placé pour interrompre la détection. Les résultats obtenus sont reportés dans le tableau de la figure 22.

Secteur testé	D (pts/m^2)	T (s)	P (%)	C (%)	F (%)
Saint-Mont	8.62	28.70	74.90	67.46	70.99
Gris-Mouton	6.86	30.18	88.13	69.87	77.94
Grand-Rupt	7.47	27.55	78.37	73.01	75.60
Tête des Cuveaux	8.95	32.62	80.49	68.73	74.15

Figure 22. Mesures de performances de l'extraction automatique (extrait de [Even, Ngo 2021]); D : densité de points sur le secteur testé, T : temps d'exécution, P : mesure de précision, C : mesure de couverture, F : moyenne harmonique entre précision et couverture.

8. DISCUSSION

Les tests effectués sur le cas des pistes forestières et des structures en élévation et en creux montrent que le temps d'exécution de l'outil est compatible avec une utilisation en contexte interactif : l'utilisateur place un trait en travers de la structure à extraire sur le MNT, et le résultat s'affiche en une fraction de seconde. Le trait peut être immédiatement repositionné si la structure proposée ne convient pas, soit parce que la zone de départ ne comporte pas suffisamment de points de sol, soit parce que des structures voisines de même caractéristiques ont fait dévier la trajectoire.

L'évaluation de la qualité du tracé extrait, menée sur le cas bien contrôlé des pistes forestières, a montré également de bonnes performances en précision et en couverture par rapport aux vérités de terrain établies par numérisation manuelle de ces éléments. Les tests réalisés sur des structures de nature archéologique montrent que des mesures géométriques peuvent être produites quand le relief local n'est pas trop perturbé.

Les plantations serrées de conifères et les sous-bois de végétation basse dense et persistante produisent de nombreuses zones avec très peu de points au sol. Quelques points suffisent pour interpoler la surface du terrain et produire un MNT. Ce n'est pas le cas pour caler un modèle de coupe transversale sur un profil altimétrique trop fragmenté. L'algorithme d'extraction réussit néanmoins à franchir une bonne partie de ces obstacles quand la trajectoire de la structure ne dévie par fortement et si ses caractéristiques n'ont pas trop évolué.

Le placement des graines peut être automatisé si la structure est repérable dans le MNT. C'est le cas des pistes forestières dont la surface présente un faible gradient de pente. Cette automatisation reste difficile pour les structures dont les caractéristiques géométriques varient fortement, comme dans le cas des vestiges de murs du Saint-Mont.

La forte directivité des algorithmes utilisés ne permet pas de suivre la structure quand son tracé s'écarte trop de la direction initiale. Ainsi, l'extraction des pistes s'interrompt systématiquement au niveau des lacets. Il est possible d'estimer l'orientation de la structure, et une amélioration possible de la méthode serait de relancer une extraction à partir d'une graine correctement orientée, mais les changements de direction brusques restent encore difficiles à détecter en se basant uniquement sur des outils de géométrie discrète. C'est surtout un inconvénient pour le mode interactif car l'extension de la structure peut vite être bloquée. En mode entièrement automatique, on dispose de suffisamment de graines pour compléter le tracé de la piste de part et d'autre des changements abrupts de direction.

Les tests d'utilisabilité de l'outil ILSD effectués par des archéologues sur l'extraction de vestiges de murs anciens ont mis en avant son intérêt pour la préparation des opérations de fouilles. En effet, l'outil permet d'extraire efficacement le tracé des structures existantes, et de disposer rapidement d'une cartographie suffisante pour la planification des missions. Par ailleurs, les quelques tests effectués sur la recherche des parties encore enfouies aboutissent à des prolongements crédibles, avec la possibilité d'extraire immédiatement les profils transversaux pour une première vérification. Même si une validation complète sur site reste nécessaire, l'outil peut contribuer à gagner du temps dans ces phases de prospection. ILSD permet de visualiser directement le résultat de la modification d'un paramètre sur l'algorithme d'extraction, mais trouver un paramétrage bien adapté à la structure étudiée reste difficile.

L'étude des chemins creux menée à l'aide d'ILSD a montré que cet outil peut fournir rapidement des informations exploitables sur ces structures. L'accès immédiat aux profils longitudinal et transversaux et l'extraction de caractéristiques géométriques locales donne des indications pertinentes pour évaluer la rythmicité de leur utilisation ou pour mettre en évidence des anomalies sur leur tracé. Ce type d'information est intéressant dans le cadre d'études sur l'évolution d'un paysage. D'autre part, l'estimation de la volumétrie du sédiment manquant peut être exploitée par des géomorphologues pour l'étude plus large de l'érosion à l'échelle d'un bassin versant. Toutefois ces mesures restent sujettes à l'absence de perturbation du relief local de part et d'autre de la structure pour assurer sa bonne détection, et donc la localisation fine de la ligne de base de la structure.

9. CONCLUSION ET PERSPECTIVES

Dans le cadre du projet interdisciplinaire SolHoM-Fossard de l'Université de Lorraine, une nouvelle approche basée sur des outils de géométrie discrète pour l'extraction interactive de structures linéaires de données LiDAR brutes a été proposée. A partir d'un trait placé manuellement en travers de la structure sur une vue du MNT, des profils altimétriques de points de sols sont extraits et analysés pour détecter la coupe transversale de la structure, et la prolonger de part et d'autre du profil initial. Cette analyse directe des points classés sol évite les approximations inhérentes au MNT en contexte forestier dense. Le profil longitudinal et les profils transversaux sont immédiatement affichés pour une inspection visuelle par l'utilisateur. Dans le cas de structures en creux ou en élévation, la détection du relief local permet en plus d'estimer des grandeurs géométriques telles que la largeur ou la hauteur des coupes transversales, ou encore le volume de la structure sur un tronçon précis. Cette approche a été implantée dans un nouvel outil logiciel, ILSD, accessible en code ouvert, exécutable sur les principaux systèmes d'exploitation.

Les évaluations menées sur le cas aisément contrôlable des pistes forestières ont montré de bonnes performances en temps d'exécution et en qualité du résultat produit. Des tests d'utilisabilité, effectués par des archéologues sur la détermination du tracé de vestiges de murs anciens ont montré le fort potentiel d'ILSD dans le cadre de la préparation de campagnes de fouilles, qu'il s'agisse de la détermination du tracé de parties déjà mise au jour ou de l'aide à la localisation de parties encore enfouies. Par ailleurs, dans le cadre de l'étude de plusieurs séries de chemins creux, des mesures géométriques de ces structures ont pu rapidement être obtenues pour étudier l'origine de leur formation et comprendre certaines déviations locales de leur tracé.

Une limitation actuelle de la méthode, liée à la directivité des algorithmes utilisés, empêche d'étendre l'extraction des structures quand leur direction s'écarte trop de la direction initiale. En particulier, les lacets ne peuvent pas être franchis. Une piste d'amélioration serait donc d'ajouter une estimation fine de l'orientation de la structure extraite, et surtout de sa tendance, pour prédire les changements abrupts de direction. A partir de cette information, il serait alors possible de tenter de prolonger la structure par l'ajout d'une nouvelle graine correctement orientée.

Actuellement, la localisation du centre des coupes transversales est fortement bruitée, produisant une sur-estimation de la longueur de la structure et des risques accrus de déviation vers une possible structure voisine de mêmes caractéristiques. Il serait donc également intéressant d'intégrer dans l'algorithme d'extraction des outils de filtrage pour mieux estimer la ligne centrale et les dimensions de la structure.

L'approche s'applique à une large variété de structures linéaires. Il en résulte un nombre conséquent de paramètres à fixer. Bien que la plupart de ces paramètres aient une interprétation géométrique directe, leur multiplicité complexifie les tâches de réglage, et peut entraver l'utilisabilité de l'outil. Aussi est-il espéré que la diffusion largement ouverte d'ILSD contribuera à recueillir suffisamment de retours d'expérience, pour permettre la mise en place de jeux de paramètres adaptés aux principaux contextes d'utilisation.

Un export des structures linéaires extraites vers le format "shape" reconnu par les systèmes d'information géométrique est disponible. L'idéal serait toutefois de disposer d'un couplage plus étroit de l'outil avec ces environnements de travail. La mise à disposition du code sous licence GNU GPL devrait contribuer à rendre plus simple ce travail d'intégration.

Un atout non négligeable de l'approche proposée dans ILSD est sa possible complémentarité avec d'autres méthodes, offrant ainsi un potentiel élevé d'amélioration. L'exemple de l'automatisation de la détection des pistes forestières montre comment l'extraction interactive peut être adaptée pour obtenir une version non supervisée, quand on dispose d'une spécification fine des structures à détecter. Une perspective prometteuse à plus long terme serait de combiner cette approche avec des outils d'apprentissage supervisé, par exemple des réseaux de neurones convolutionnels. Ces derniers pourraient prendre en charge la sélection de graines dans les données pour lancer l'extraction des structures avec les outils rapides de géométrie discrète. Dans ce contexte, ILSD pourrait déjà faciliter la tâche d'annotation, préalable à l'apprentissage.

Remerciements Cette étude a été menée dans le cadre d'un projet interdisciplinaire de l'Université de Lorraine, SolHoM-Fossard (*Interactions hommes-milieux et évolution des sols au cours des deux derniers millénaires dans le massif du Fossard*) porté par Anne Poszwa. Les données LiDAR du Fossard, gracieusement mises à disposition du projet, ont été acquises dans le cadre du PCR AGER (*Projet collectif de recherche — Archéologie et GEoarchéologie du premier Remiremont et de ses abords*), dirigé par Charles Kraemer. Les auteurs remercient également Axelle Grzesznik, Thomas Chenal, Anne Gebhardt pour leur participation aux campagnes de test de l'outil, ainsi que Pierre Even pour sa contribution à l'architecture logicielle d'ILSD.

REFERENCES

Amable, G., Devereux, B., Cockerell, T., Renshaw, G., 2004. Analysis of interaction patterns between vegetation canopies and small footprint, high-density, airborne LIDAR. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 34(B7), 1085–1089.

Axelsson, P., 2000. DEM generation from laser scanner data using adaptive TIN models. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, XXXIII(part B4/1), 110–117.

Bailly, J., Lagacherie, P., Millier, C., Puech, C., Kosuth, P., 2008. Agrarian landscapes linear features detection from LiDAR: application to artificial drainage networks. *International Journal of Remote Sensing*, 29, 3489–3508. doi.org/10.1080/01431160701469057.

Baruch, A., Filin, S., 2011. Detection of gullies in roughly textured terrain using airborne laser scanning data. *ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing*, 66, 564–578. doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2011.03.001.

Bennett, R., Welham, K., Hill, R. A., Ford, A., 2012. A comparison of visualization techniques for models created from airborne laser scanned data. *Archaeological Prospection*, 19, 41–48. doi.org/10.1002/arp.1414.

Boardman, J., 2013. The hydrological role of 'sunken lanes' with respect to sediment mobilization and delivery to watercourses with particular reference to West Sussex, southern England. *Journal of Soils and Sediments*, 13(9), 1636–1644. doi.org/10.1007/s11368-013-0754-7.

Challis, K., Forlin, P., Kincey, M., 2011. A generic toolkit for the visualisation of archaeological features on airborne LiDAR elevation data. *Archaeological Prospection*, 18(4), 279–289. doi.org/10.1002/arp.421.

Chassery, J.-M., Montanvert, A., 1991. *Geométrie discrète en analyse d'images.* Hermès, Paris.

Clode, S., Rottensteiner, F., Kootsookos, P., Zelnicker, E., 2007. Detection and vectorisation of roads from lidar data. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 73(5), 517–536. doi.org/10.14358/PERS.73.5.517.

Coeurjolly, D., Chassery, J.-M., Montanvert, A., 2007. *Geométrie discrète et images numériques.* Traités IC2 – Signal et image, Hermès Science, Paris.

Coluzzi, R., Lanorte, A., Lasaponara, R., 2010. On the LiDAR contribution for landscape archaeology and palaeoenvironmental studies: the case study of Bosco dell'Incoronata (Southern Italy). *Advances in Geosciences*, 24, 125–132. doi.org/10.5194/adgeo-24-125-2010.

David, N., Mallet, C., Pons, T., Chauve, A., Bretar, F., 2009. Pathway detection and geometrical description from ALS data in forested montaneous areas. *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 38(part 3/W8), 242–247.

De Geeter, S., Poesen, J., Vanmaercke, M., 2020. Does the topographic threshold concept explain the initiation points of sunken lanes in the European loess belt? *Catena*, 192. doi.org/10.1016/j.catena.2020.104586.

Debled-Rennesson, I., Feschet, F., Rouyer-Degli, J., 2006. Optimal Blurred Segments Decomposition of Noisy Shapes in Linear Times. *Computers and Graphics*, 30, 30-36. doi.org/10.1016/j.cag.2005.10.007.

Devereux, B., Amable, G., Crow, P., 2008. Visualisation of LiDAR terrain models for archaeological feature detection. *Antiquity*, 82, 470–479. doi.org/10.1017/S0003598X00096952.

Devereux, B., Amable, G., Crow, P., Cliff, A., 2005. The potential of airborne lidar for detection of archaeological features under woodland canopies. *Antiquity*, 79, 648–660. doi.org/10.1017/S0003598X00114589.

Doneus, M., Briese, C., 2006. Full-waveform airborne laser scanning as a tool for archaeological reconnaissance. S. Campana, M. Forte (eds), *From Space to Place: Proceedings of the 2nd International Conference on Remote Sensing in Archaeology*, BAR International Series, 1568, Rome, Italy, 99–105.

Doneus, M., Briese, C., Fera, M., Janner, M., 2008. Archaeological prospection of forested areas using full-waveform airborne laser scanning. *Journal of Archaeological Science*, 35, 882–893. doi.org/10.1016/j.jas.2007.06.013.

Evans, J. S., Hudak, A. T., 2007. A multiscale curvature algorithm for classifying discrete return lidar in forested environments. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 45(4), 1029–1038. doi.org/10.1109/TGRS.2006.890412.

Even, P., Grzesznik, A., Gebhardt, A., Chenal, T., Even, P., Ngo, P., 2021. Interactive extraction of linear structures from LiDAR raw data for archaeomorphological structure prospection. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XLIII-B2-2021, 153–161. doi.org/10.5194/isprs-archives-XLIII-B2-2021-153-2021.

Even, P., Ngo, P., 2020. Live extraction of curvilinear structures from LiDAR raw data. *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences (XXIV ISPRS Congress)*, V-2, 211–219. doi.org/10.5194/isprs-annals-V-2-2020-211-2020.

Even, P., Ngo, P., 2021. Automatic forest road extraction from LiDAR data of mountainous areas. J. Lindblad, F. Malmberg, N. Sladoje (eds), *Proc. of the First International Joint Conference on Discrete Geometry and Mathematical Morphology*, LNCS, 12708, Springer, Uppsala, Sweden, 93–106.

Even, P., Ngo, P., Kerautret, B., 2019. Thick line segment detection with fast directional tracking. *Proc. of 20th International Conference on Image Analysis and Processing (ICIAP, Springer LNCS 11752)*, Trento, Italy, 159–170.

Ferraz, A., Mallet, C., Chehata, N., 2016. Large-scale road detection in forested montainous areas using airborne topographic lidar data. *ISPSR Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 112, 23–36. doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2015.12.002.

Garnier, E., 2004. Un mode de transport montagnard traditionel : le schlittage. *Cahiers d'étude du groupe d'Histoire des Forêts Françaises – Forêt, Environnement et Sociétés XVIes-XXeS*, Forêt et transport traditionnels.

Gebhardt, A., 2008. Impacts anthropiques anciens sur les sols forestiers. quelques études de cas en contexte archéologique et expérimental. J.-L. Dupouey, E. Dambrine, C. Dardignac, M. Georges-Leroy (eds), *Sylva, la mémoire des forêts*, 211–218.

Georges-Leroy, M., Bock, J., Dambrine, E., Dupouey, J.-L., 2011. Apport du lidar à la connaissance de l'histoire de l'occupation du sol en forêt de Haye. *ArcheoSciences*, 35, 117–129. doi.org/10.4000/archeosciences.3015.

Grzesznik, A., 2020. Le Saint-Mont : système d'enceintes en pierre sèche. Rapport de prospection thématique et de sondages, Service Régional de l'Archéologie, Metz.

Hesse, R., 2010. LiDAR-derived local relief models – a new tool for archaeological prospection. *Archaeological Prospection*, 17(2), 67–72. doi.org/10.1002/arp.374.

Hesse, R., 2014. Geomorphological traces of conflict in high-resolution elevation models. *Applied Geography*, 46, 11–20. doi.org/10.1016/j.apgeog.2013.10.004.

Jiang, X., Bunke, H., 1994. Fast segmentation of range images into planar regions by scan line grouping. *Machine Vision and Applications*, 7, 115–122. doi.org/10.1007/BF01215806.

Jones, A. F., Brewer, P. A., Johnstone, E., Macklin, M. G., 2007. High-resolution interpretative geomorphological mapping of river valley environments using airborne LiDAR data. *Earth Surface Processes and Landforms*, 32, 1574–1592. doi.org/10.1002/esp.1505.

Katz, S., Tal, A., 2013. Improving the visual comprehension of point sets. *Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, IEEE, Portland, Oregon, USA, 121–128.

Kerautret, B., Even, P., 2009. Blurred segments in gray level images for interactive line extraction. P. Wiederhold, R. P. Barneva (eds), *Proceedings of the 13th International Workshop on Combinatorial Image Analysis*, LNCS, 5852, Springer, Playa del Carmen, Mexico, 176–186.

Klette, R., Rosenfeld, A., 2004. *Digital Geometry: Geometric Methods for Digital Picture Analysis.* Morgan Kaufmann, San Francisco.

Kokalj, Ž., Zakšek, K., Oštir, K., 2011. Application of sky-view factor for the visualisation of historic landscape features in lidar-derived relief models. *Antiquity*, 85, 263–273. doi.org/10.1017/S0003598X00067594.

Kudelski, D., Viseur, S., Mari, J.-L., 2009. Détection de lignes caractéristiques sur maillages triangulés d'acquisition LIDAR. Application à la géologie. *Revue Electronique Francophone d'Informatique Graphique*, 3(3), 1–9.

Lasaponara, R., Coluzzi, R., Gizzi, F. T., Masini, N., 2010. On the LiDAR contribution for the archaeological and geomorphological study of a deserted village in Southern Italy. *Journal of Geophysics and Engineering*, 7, 155–163. doi.org/10.1088/1742-2132/7/2/S01.

Lasaponara, R., Coluzzi, R., Masini, N., 2011. Flights into the past: full-waveform airborne laser scanning data for archaeological investigation. *Journal of Archaeological Science*, 38(9), 2061–2070. doi.org/10.1016/j.jas.2010.10.003.

Liu, Q., Kampffmeyer, M., Jenssen, R., Salberg, A.-B., 2019. Road mapping in LiDAR images using a joint-task dense dilated convolutions merging network. *IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS)*, Yokohama, Japan, 5041–5044.

Mallet, C., Bretar, F., 2009. Full-waveform topographic Lidar: state-of-the-art. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 64(1), 1–16. doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2008.09.007.

Mandlburger, G., Vetter, M., Milenkovic, M., Pfeifer, N., 2011. Derivation of a countrywide river network based on airborne laser scanning DEMs – results of a pilot study. *19th International Congress on Modelling and Simulation*, Perth, WA, Australia, 2423–2429.

Mayoral, A., Toumazet, J.-P., Simon, F.-X., Vautier, F., Peiry, J.-L., 2017. The highest gradient model: a new method for analytical assessment of the efficiency of LiDAR-derived visualization techniques for landform detection and mapping. *Remote Sensing*, 9(2). doi.org/10.3390/rs9020120.

McNeary, R. W., 2014. Lidar investigation of Knockdhu promontory and its environs, County Antrim, Northern Ireland. *Archaeological Prospection*, 21, 263–276. doi.org/10.1002/arp.1488.

Merveille, O., Naegel, B., Talbot, H., Najman, L., Passat, N., 2017. 2D filtering of curvilinear structures by ranking the orientation responses of path operators (RORPO). *Image Processing On Line*, 7, 246–261. doi.org/10.5201/ipol.2017.207.

Nuninger, L., Fruchart, C., Opitz, R., 2010. LiDAR: quel apport pour l'analyse des paysages ? Bulletin de liaison AGER 20, Association du Monde Rural Gallo-Romain.

Popescu, S. C., Wynne, R. H., Nelson, R. F., 2002. Estimating plot-level tree heights with lidar: local filtering with a canopy-height based variable window size. *Computers and Electronics in Agriculture*, 37(1-3), 71–95. doi.org/10.1016/S0168-1699(02)00121-7.

Roelens, J., Höfle, B., Dondeyne, S., Van Orshoven, J., Diels, J., 2018. Drainage ditch extraction from LiDAR point clouds. *ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing*, 146, 409–420. doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2018.10.014.

Rowlands, A., Sarris, A., Bell, J., 2006. Airborne multi sensor remote sensing of exposed and subsurface archaeological remains at Itanos and Roussolakkos, Crete. S. Campana, M. Forte (eds), *From Space to Place: Proceedings of the 2nd International Conference on Remote Sensing in Archaeology*, BAR International Series, 1568, Rome, Italy, 113–116.

Salberg, A.-B., Trier, Ø. D., Kampffmeyer, M., 2017. Large-scale mapping of small roads in lidar images using deep convolutional neural networks. *20th Scandinavian Conference on Image Analysis (SCIA, Springer LNCS 10270)*, Tromsø, Norway, 193–204.

Sevara, C., Pregesbauer, M., Doneus, M., Verhoeven, G., Trinks, I., 2016. Pixel versus object – a comparison of strategies for the semi-automated mapping of archaeological features using airborne laser scanning data. *Journal of Archaeological Science: Reports*, 5, 485–498. doi.org/10.1016/j.jasrep.2015.12.023.

Sithole, G., Vosselman, G., 2006. Bridge detection in airborne laser scanner data. *ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing*, 61, 33–46. doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2006.07.004.

Sittler, B., 2004. Revealing historical landscapes by using airborne laser scanning. A 3-D model of ridge and furrow in forests near Rastatt (Germany). *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, XXXVI(Part 8/W2), 258–261.

Sittler, B., Schellberg, S., 2006. The potential of LIDAR in assessing elements of cultural heritage hidden under forest canopies or overgrown by vegetation: possibilities and limits in detecting microrelief structures for archaeological surveys. S. Campana, M. Forte (eds), *From Space to Place: Proceedings of the 2nd International Conference on Remote Sensing in Archaeology*, BAR International Series, 1568, Rome, Italy, 117–122.

Štular, B., Kokalj, Ž., Oštir, K., Nuninger, L., 2012. Visualization of lidar-derived relief models for detection of archaeological features. *Journal of Archaeological Science*, 39(11), 3354–3360. doi.org/10.1002/arp.374.

Toumazet, J.-P., Vautier, F., Roussel, E., Dousteyssier, B., 2017. Automatic detection of complex archaeological grazing structures using airborne laser scanning data. *Journal of Archaeological Science: Reports*, 12, 569–579. doi.org/10.1016/j.jasrep.2017.03.012.

Trier, Ø. D., Salberg, A.-B., Pilø, L. H., 2016. Semi-automatic mapping of charcoal kilns from airborne laser scanning data using deep learning. M. Matsumoto, E. Uleberg (eds), *Oceans of Data: Proc. of the 44th Conference on Computer Applications and Quantitative Methods in Archaeology*, Oslo, Norway, 219–231.

Trier, Ø. D., Zortea, M., Tonning, C., 2015. Automatic detection of mound structures in airborne laser scanning data. *Journal of Archaeological Science: Reports*, 2, 69–79. doi.org/10.1016/j.jasrep.2015.01.005.

Wehr, A., Lohr, U., 1999. Airborne laser scanning – an introduction and overview. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 54(2–3), 68–82. doi.org/10.1016/S0924-2716(99)00011-8.

White, R. A., Dietterick, B. C., Mastin, T., Strohman, R., 2010. Forest roads mapped using LiDAR in steep forested terrain. *Remote Sensing*, 2(4), 1120–1141. doi.org/10.3390/rs2041120.