

Dessertes forestières à l'échelle d'une commune : Analyse spatiale et développement d'un outil d'aide à la navigation. Cas de la commune de Nassogne

Auteur : Beauchamp, Gilles

Promoteur(s) : Lejeune, Philippe

Faculté : Gembloux Agro-Bio Tech (GxABT)

Diplôme : Master en bioingénieur : gestion des forêts et des espaces naturels, à finalité spécialisée

Année académique : 2021-2022

URI/URL : <http://hdl.handle.net/2268.2/13849>

Avertissement à l'attention des usagers :

Tous les documents placés en accès ouvert sur le site le site MatheO sont protégés par le droit d'auteur. Conformément aux principes énoncés par la "Budapest Open Access Initiative"(BOAI, 2002), l'utilisateur du site peut lire, télécharger, copier, transmettre, imprimer, chercher ou faire un lien vers le texte intégral de ces documents, les disséquer pour les indexer, s'en servir de données pour un logiciel, ou s'en servir à toute autre fin légale (ou prévue par la réglementation relative au droit d'auteur). Toute utilisation du document à des fins commerciales est strictement interdite.

Par ailleurs, l'utilisateur s'engage à respecter les droits moraux de l'auteur, principalement le droit à l'intégrité de l'oeuvre et le droit de paternité et ce dans toute utilisation que l'utilisateur entreprend. Ainsi, à titre d'exemple, lorsqu'il reproduira un document par extrait ou dans son intégralité, l'utilisateur citera de manière complète les sources telles que mentionnées ci-dessus. Toute utilisation non explicitement autorisée ci-avant (telle que par exemple, la modification du document ou son résumé) nécessite l'autorisation préalable et expresse des auteurs ou de leurs ayants droit.

DESSERTES FORESTIÈRES À L'ÉCHELLE D'UNE COMMUNE : ANALYSE SPATIALE ET DÉVELOPPEMENT D'UN OUTIL D'AIDE À LA NAVIGATION

CAS DE LA COMMUNE DE NASSOGNE

GILLES BEAUCHAMP

**TRAVAIL DE FIN D'ÉTUDES PRÉSENTÉ EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLÔME DE
MASTER BIOINGÉNIEUR EN GESTION DES FORÊTS ET DES ESPACES NATURELS**

ANNÉE ACADÉMIQUE 2021-2022

(CO)-PROMOTEUR(S): PROF. LEJEUNE PHILIPPE

© Toute reproduction du présent document, par quelque procédé que ce soit, ne peut être réalisée qu'avec l'autorisation de l'auteur et de l'autorité académique¹ de Gembloux Agro-Bio Tech.

Le présent document n'engage que son auteur.

¹ Dans ce cas, l'autorité académique est représentée par le(s) promoteur(s) membre du personnel(s) enseignant de GxABT.

DESSERTES FORESTIÈRES À L'ÉCHELLE D'UNE COMMUNE : ANALYSE SPATIALE ET DÉVELOPPEMENT D'UN OUTIL D'AIDE À LA NAVIGATION

CAS DE LA COMMUNE DE NASSOGNE

GILLES BEAUCHAMP

**TRAVAIL DE FIN D'ÉTUDES PRÉSENTÉ EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLÔME DE
MASTER BIOINGÉNIEUR EN GESTION DES FORÊTS ET DES ESPACES NATURELS**

ANNÉE ACADÉMIQUE 2021-2022

(CO)-PROMOTEUR(S): PROF. LEJEUNE PHILIPPE

Organisme d'accueil

Ce travail a été réalisé en collaboration avec l'association sans but lucratif *Ressources Naturelles Développement*.

Remerciements

Ce travail de fin d'études m'a permis de développer de nouvelles compétences dans un secteur prometteur et d'intégrer la vie d'entreprise durant plusieurs mois. Ce travail n'aurait pas pu se dérouler sans l'aide de plusieurs personnes que je tiens à remercier.

Tout d'abord, je tiens à remercier mon promoteur Philippe Lejeune pour ses conseils avisés et sa disponibilité tout au long de ce travail.

Ensuite, je voudrais remercier toute l'équipe de Ressources Naturelles Développement (RND) sans qui ces mois de travail n'auraient pas été les mêmes. Je tiens à remercier particulièrement Pauline Gillet qui s'est toujours montrée disponible et à l'écoute, qui m'a donné de précieux conseils pour l'élaboration de ce TFE ainsi que pour ses relectures. Je remercie également Marie-Caroline Detroz, directrice de RND, qui m'a permis d'intégrer cette équipe, d'abord pour mon stage, puis pour mon TFE.

Je remercie également ma famille et mes proches qui m'ont accompagné et soutenu durant toutes ces années à la faculté et sans qui tout cela n'aurait été possible.

Merci à mes amis Gembloutois et particulièrement à mes cokotteurs pour tous ces bons moments ainsi que pour les soirées passées.

Enfin, je remercie particulièrement Camille pour sa bonne humeur au quotidien (ou presque), pour son aide lors des visites de terrain, mais aussi pour tous les moments inoubliables passés ensemble durant ces années et pour ceux à venir.

Gilles Beauchamp

Résumé

Au cours des dernières décennies, la gestion durable des forêts dans le monde est devenue un élément central dans notre manière de mobiliser la ressource ligneuse. En parallèle, l'utilisation du matériau bois et de ses dérivés connaît un réel essor dans le cadre de la transition écologique. Ces dernières années, marquées par la crise sanitaire, les massifs forestiers wallons se sont vus d'autant plus fréquentés par un public en quête d'un retour à la nature. Ainsi, la desserte forestière joue un rôle prépondérant dans le cadre d'une gestion multifonctionnelle de nos forêts. Actuellement, peu d'études en Belgique s'intéressent à cet élément du paysage, parfois oublié, mais essentiel.

Cette étude s'intéresse donc à la desserte forestière à l'échelle de la commune de Nassogne dans l'optique d'une analyse spatiale approfondie et pour la mise en place d'un outil d'aide à la navigation pour les grands convois forestiers de type grumier. L'analyse cartographique de la desserte et du paysage forestier de la commune s'est faite à l'aide, d'une part, des données disponibles sur la plateforme OpenStreetMap (OSM) et, d'autre part, à partir des données obtenues par la technologie LiDAR. Avant d'entamer la seconde partie du travail, et dans le but d'évaluer la précision des données OSM, des vérifications ont été faites au niveau de la précision géométrique, mais également au niveau de l'exhaustivité et de la précision de la classification des voiries. Les résultats, en accord avec d'autres études, ont montré une bonne précision des données OSM. Ceci met en avant l'intérêt de l'utilisation de ces données dans l'élaboration d'un outil de guidage dédié au transport du bois en Wallonie.

Ce dernier aspect a été mis en avant au sein de cette étude. En effet, l'intérêt de cette base de données est qu'elle reprend tant le réseau routier public que le réseau de voiries forestières, souvent incomplet ou absent des outils de navigation classiques. Pour ce faire, un outil d'aide à la navigation, basé sur les données OSM et destiné aux grumiers, a été mis en place à l'aide de l'extension pgRouting. Plus précisément, l'algorithme de Dijkstra permet de créer des itinéraires probants.

Enfin, de nombreuses études mettent en avant l'intérêt et les résultats obtenus à partir des nouvelles technologies pour développer davantage le réseau OSM. Celui-ci pourrait dès lors s'affirmer comme une source de données complète et fiable, sur un large territoire, dans la création d'un outil d'aide à la navigation.

Mots-clés : desserte forestière; voirie; Nassogne; OpenStreetMap; outil; guidage; navigation; pgRouting; Dijkstra

Abstract

In the last decades, the sustainable management of the world's forests has become a central element in the way we use wood resources. At the same time, the use of wood and its derivatives is booming in the context of the ecological transition. In recent years, marked by the health crisis, Walloon forests have become even more popular with the public in search of a return to nature. Thus, forest access plays an important role in the multifunctional management of our forests. Currently, few studies in Belgium focus on this sometimes forgotten but essential landscape element.

This study therefore focuses on the forest service roads at the scale of the municipality of Nassogne with a view to an in-depth spatial analysis and the implementation of a navigation aid tool for large logging convoys. The cartographic analysis of the forest service and the forest landscape of the municipality was carried out using, on the one hand, data available on the OpenStreetMap (OSM) platform and, on the other hand, data obtained by LiDAR technology. Before starting the second part of the work, and in order to evaluate the accuracy of the OSM data, verifications were made on the level of geometric accuracy, but also on the level of completeness and accuracy of the classification of roads. The results, in line with other studies, showed a good accuracy of OSM data. This highlights the interest of using these data in the development of a guidance tool dedicated to wood transport in Wallonia.

This last aspect was brought forward in this study. Indeed, the interest of this database is that it includes both the public road network and the forest service roads, which is often incomplete or absent from the classic navigation tools. To this end, a navigation tool, based on OSM data and intended for logging trucks, was set up using the pgRouting extension. More specifically, the Dijkstra algorithm was used to create convincing routes.

Finally, numerous studies have highlighted the interest and results obtained from new technologies to further develop the OSM network. This network could therefore be used as a complete and reliable source of data, over a large area, in the creation of a navigation aid tool.

Keywords: forest service roads; road; Nassogne; OpenStreetMap; tool; guidance; navigation; pgRouting; Dijkstra

1.	Introduction	1
1.1.	La forêt wallonne.....	1
1.1.1.	Description générale	1
1.1.2.	La circulation en forêt.....	1
1.2.	Le rôle des voiries dans la multifonctionnalité de la forêt	2
1.2.1.	Le rôle économique des voiries forestières	3
1.2.2.	Le rôle environnemental des voiries forestières	4
1.2.3.	Le rôle social des voiries forestières	6
1.3.	Les types de dégâts fréquemment rencontrés sur les voiries	6
1.3.1.	L’orniérage	6
1.3.2.	Le scalpage	7
1.4.	Le passage de véhicules.....	7
1.4.1.	Les caractéristiques d’un grumier	7
1.4.2.	L’accès aux voiries forestières	8
1.4.3.	Dimensionnements idéals d’une voirie forestière	8
1.4.4.	Autres infrastructures composant la desserte forestière	10
1.5.	Utilisation des outils de guidage.....	11
1.6.	Objectifs du travail	12
2.	Matériel et méthodes	13
2.1.	Zone d’étude	13
2.1.1.	Zones Natura 2000.....	15
2.1.2.	Propriétaires forestiers.....	16
2.1.3.	Structure et composition de la forêt.....	17
2.2.	Utilisation des données LiDAR.....	18
2.3.	Les données OpenStreetMap	18
2.3.1.	Précision géométrique des données OpenStreetMap	19
2.3.2.	Exhaustivité et typologie des données OpenStreetMap	20
2.4.	Cartographie des voiries	21
2.5.	Cartographie des accès	24
2.6.	Cartographie des autres éléments de la desserte forestière	24
2.7.	Analyse approfondie de la structure des peuplements forestiers	25

2.8.	Outil de guidage dédié aux grumiers.....	27
2.8.1.	Obtention des données.....	27
2.8.2.	Osm2pgRouting.....	28
2.8.3.	PostgreSQL.....	29
2.8.4.	PgRouting	29
2.8.5.	Geoserver.....	30
2.8.6.	OpenLayers.....	31
3.	Résultats	32
3.1.	Précision géométrique des données OpenStreetMap	32
3.2.	Exhaustivité et typologie des données OSM.....	33
3.3.	Adéquation chemins – véhicules	34
3.4.	La sécurité des accès.....	36
3.5.	Localisation des chemins pouvant accueillir les grumiers	37
3.6.	Localisation des quais de chargement	40
3.7.	Structure et volume de la forêt résineuse	41
3.8.	Outil de guidage interactif	43
3.9.	Test de l’outil de guidage	44
4.	Discussion	47
4.1.	Le réseau de dessertes forestières sur la commune de Nassogne.....	47
4.2.	Utilisation des données OpenStreetMap dans un système de guidage	48
4.3.	Perspectives	48
4.3.1.	Le guidage en forêt wallonne	48
4.3.2.	Gestion en direct du réseau de voiries	48
5.	Conclusion.....	50
	Bibliographie.....	51
	Annexes.....	55

Liste des figures

Figure 1. Les trois facettes d'une forêt multifonctionnelle.....	3
Figure 2. Photo montrant des dégâts sur un arbre en bordure de chemin forestier	5
Figure 3. Schéma d'une ornière. (Source : Rotaru, 1985)	6
Figure 4. Schéma d'une voirie forestière. (Source : Pro Bos, 2020)	7
Figure 5. Schéma idéal d'une voirie débouchant sur une route publique (Source : Pro Bos, 2020)	9
Figure 6. Aire de croisement le long de la voirie. (Source : Préfet des Bouches-du-Rhône, 2014)	9
Figure 7. Schémas illustrant les différents cas possibles pour l'aménagement des places de dépôt et de retournement. (Source : Pro Bos, 2020)	11
Figure 8. Carte des principaux types de sols sur la commune de Nassogne.....	13
Figure 9. Climat de la commune de Nassogne ces 30 dernières années. (Source : IRM)	14
Figure 10. Carte du modèle numérique de terrain (MNT) sur la commune de Nassogne.....	14
Figure 11. Réseau hydrographique de la commune de Nassogne	15
Figure 12. Zones Natura 2000 présentes en forêt	16
Figure 13. Structure des propriétés forestières dans la commune de Nassogne	17
Figure 14. Modèle numérique de hauteur à partir du MNS et du MNT. (Source : Lejeune, 2017)	18
Figure 15. Comparaison entre une couche hillshade classique (gauche) et une couche hillshade retravaillée avec la fonction "rugosité" (droite). Zoom sur une zone de la commune de Nassogne ...	20
Figure 16. Réseau de voiries OSM sur la commune de Nassogne	22
Figure 17. Modèle numérique de hauteur basé sur les données LiDAR 2013-2014.....	26
Figure 18. Processus pour la mise en place d'un outil de guidage.....	27
Figure 19. Zone du réseau de voiries OSM prise en compte dans l'élaboration de l'outil de guidage .	28
Figure 20. Fonctionnement de l'algorithme de Dijkstra. (Source : Ur Rehman et al., 2018)	30
Figure 21. Répartition des points en fonction des classes de distances, dans la mesure de la précision géométrique des données OSM.....	32
Figure 22. Entrée d'une propriété privée avec barrière et panneau interdit	33
Figure 23. Sillon creusé par l'eau sur un chemin en pente	34
Figure 24. Nombre de segments de chemins classés en fonction de la largeur de la chaussée (m) et du type de chemin.....	35
Figure 25. Grumier empruntant une route forestière sur la commune de Nassogne	35
Figure 26. Localisation des accès dans la commune de Nassogne, classés en fonction de la visibilité	37
Figure 27. Classement des distances par rapport aux voiries accessibles aux grumiers	38
Figure 28. Zoom sur la zone 2 désignée sur la figure 27	39
Figure 29. Classement des distances (m) par rapport aux quais de chargement	40
Figure 30. Aire de stockage en bordure de voirie	41
Figure 31. Répartition des hauteurs dominantes par classe, sur la commune de Nassogne	42
Figure 32. Illustration de la page web	43
Figure 33. Itinéraire n°1 entre la scierie Fruytier et une parcelle résineuse choisie aléatoirement.....	44
Figure 34. Itinéraire n°2 entre la scierie Fruytier et une parcelle résineuse située à l'est de la commune de Nassogne	45
Figure 35. Itinéraire n°3 entre un quai de chargement situé dans le village d'Ambly et le parc à grumes de Mochamps.....	46

Liste des tableaux

Tableau 1. Pouvoir porteur en fonction du type de sol. Source : Guide Prosol (ONF et al., 2009).....	5
Tableau 2. Classification cartographique de la desserte forestière, sur base d'OpenStreetMap.....	23
Tableau 3. Estimation du VHA moyen, en forêt résineuse, sur la commune de Nassogne	42

Définitions

Chemin : voie ouverte à la circulation du public, en terre ou empierrée, plus large qu'un sentier, qui n'est pas aménagée pour la circulation des véhicules en général (Région Wallonne, 2021).

Cloisonnement d'exploitation : voie servant à canaliser le passage des engins forestiers au sein d'un peuplement et n'étant pas accessible au public. Cet élément ne fait pas partie du réseau de voiries forestières.

Desserte forestière : « la desserte désigne les différents aménagements utilisés pour la gestion des forêts : routes forestières, place de dépôts... » (FIBRA (Fédération forêt-bois Rhône-Alpes), n.d.)

Place de chargement ou quai de chargement : place aménagée, empierrée, le plus souvent associée à une aire de stockage, servant à accueillir les grumiers à charger.

Place de dépôt ou aire de stockage : elle permet le stockage des bois et elle est accessible aux camions pour charger les bois débordés. (ONF, 2017). La place de dépôt ou aire de stockage est strictement destinée à l'entrepôt des bois en attente de chargement. Elle n'a pas besoin d'être empierrée. (Pro Bos, 2020a)

Place de retournement : endroit conçu pour permettre aux véhicules de types grumiers de faire demi-tour.

Route : voie ouverte à la circulation du public, à revêtement hydrocarboné, bétonnée ou pavée, dont l'assiette est aménagée pour la circulation des véhicules en général (Région Wallonne, 2021).

Sentier : voie ouverte à la circulation du public, étroite, dont la largeur, inférieure à un mètre, n'excède pas celle nécessaire à la circulation des piétons (Région Wallonne, 2021).

Voirie : « dans son sens juridique habituel, la voirie désigne l'ensemble des voies de communication affectées à la circulation publique » (Durviaux et al., 2010)

Voirie communale : « voie de communication par terre affectée à la circulation du public, indépendamment de la propriété de son assiette, y compris ses dépendances qui sont nécessaires à sa conservation, et dont la gestion incombe à l'autorité communale » (Wallex, 2021)

Voirie forestière : « la voirie est considérée comme forestière lorsqu'elle est bordée de part et d'autre par des milieux forestiers (productifs ou non). Lorsqu'un seul côté est bordé par un milieu forestier, par convention, un élément de voirie sur deux est considéré comme forestier. » (Inventaire permanent des ressources forestières de Wallonie, 2021)

Voirie publique : « la notion de voirie publique est une notion de pur fait : une voirie est publique dès l'instant où elle est accessible au public. L'assiette d'une voirie publique peut aussi bien appartenir aux pouvoirs publics qu'à un particulier. Dès l'instant où une voirie est publique, elle se voit appliquer les charges et obligations découlant de la police de la voirie. » (Tousapied.be, 2021)

1. Introduction

1.1. La forêt wallonne

1.1.1. Description générale

D'après les chiffres de l'inventaire permanent des ressources forestières de Wallonie, les forêts wallonnes représentent aujourd'hui un tiers de la surface du territoire wallon, avec une surface totale de 563 000 hectares, dont la majorité est destinée à la production. Les peuplements feuillus représentent 57% de la forêt productive avec une très forte représentation du hêtre et des chênes indigènes qui concentrent environ 70% du volume de bois feuillus sur pied, dans les forêts wallonnes. A l'inverse, les essences résineuses représentent 43% des forêts productives wallonnes, où l'épicéa est l'essence de prédilection puisqu'elle représente à elle seule 75% du volume de bois sur pied sur l'ensemble du territoire wallon (Office économique wallon du bois, 2021).

En termes de propriétés, environ la moitié des forêts wallonnes sont publiques, tandis que l'autre moitié appartient à des propriétaires privés. Ceux-ci possèdent, dans plus de 90% des cas, des surfaces forestières inférieures à 5 hectares (Office économique wallon du bois, 2021), soit 75 000 hectares partagés par environ 84 000 propriétaires privés. Ironie du sort, ce nombre tend encore à augmenter puisque, au fur et à mesure des générations et des héritages, les parcelles ne cessent de se diviser. En plus du morcellement, sans cesse croissant, des personnes se retrouvent, malgré elles, propriétaires de parcelles forestières à la suite d'un héritage. Ces personnes n'ont parfois aucune connaissance en matière forestière, ne savent pas comment valoriser ces parcelles ou ne savent simplement pas qu'elles détiennent une parcelle de forêt.

1.1.2. La circulation en forêt

En plus de sa fonction productive, la forêt wallonne est également un lieu de loisirs ou de ressourcement. Le public qu'on y rencontre est donc large. On retrouve ainsi des promeneurs, des cyclistes, des cavaliers, des cueilleurs de champignons ou encore des skieurs (Service public de Wallonie, 2021a) lorsque les conditions s'y prêtent.

Dans le but de permettre une cohabitation harmonieuse et de préserver la quiétude au sein du paysage forestier, la Région wallonne a mis en place, dans le code forestier, une législation visant à réglementer la circulation en forêt (Service public de Wallonie, 2021a).

De façon résumée, on retrouve 3 types de voies de circulation visant à accueillir des usagers différents.

- Les sentiers, qui sont des voies de circulation dont la largeur est inférieure à 1 mètre, sont uniquement réservés aux piétons.
- Les chemins sont des voiries d'une largeur supérieure à 1 mètre qui accueillent des cyclistes, des cavaliers, des skieurs ainsi que des véhicules à moteur lorsque les conducteurs y sont autorisés.
- Les routes, dont le revêtement est hydrocarboné sont destinées à accueillir des véhicules motorisés.

1.2. Le rôle des voiries dans la multifonctionnalité de la forêt

Hormis leur rôle évident dans la facilitation des déplacements dans les massifs forestiers, les voiries forestières ont également un impact non négligeable sur d'autres composantes de la gestion forestière. De fait, elles participent activement à la multifonctionnalité de nos forêts.

L'Office National des Forêts définit la gestion multifonctionnelle comme une « gestion menée par les forestiers qui valorise à la fois les fonctions économique, environnementale et sociale des forêts, et participe à l'aménagement du territoire. Les forêts ainsi gérées offrent des services précieux :

- Un service écologique. Les écosystèmes forestiers sont un réservoir de biodiversité, stockent le carbone et atténuent les effets du changement climatique.
- Un service de protection contre les risques naturels.
- Un service économique. Le bois est au cœur de l'économie verte et est essentiel à la transition écologique. Transformé, il fournit une multitude de produits à la société (charpente, menuiserie, énergie, etc.). La récolte et la transformation du bois sont aussi une source importante d'emplois locaux.
- Un service sociétal. Espaces de ressourcement et de loisirs, source de bien-être, les forêts publiques, sauf exceptions liées à certains espaces, sont ouvertes au public : promeneurs, sportifs... » (ONF, 2020)

Ce concept de gestion multifonctionnelle de la forêt s'applique également à la desserte forestière. En effet, elle remplit plusieurs rôles, qu'ils soient environnementaux, économiques ou sociétaux.

Dans cette optique, le programme européen INTERREG a mis en place le projet « Forêt Pro Bos » car « la mauvaise accessibilité d'un massif forestier, des places de stockage en nombre insuffisant peuvent non seulement pénaliser la sylviculture et la mobilisation des bois mais aussi handicaper le développement harmonieux dans ses aspects sociaux et environnementaux d'un territoire. Des stockages anarchiques, des chargements de bois dangereux le long des chaussées, des traversées de hameaux périlleuses ont des conséquences néfastes pour les habitants et leurs élus et donnent une très mauvaise image de l'activité forestière. » (Pro Bos, 2020a)

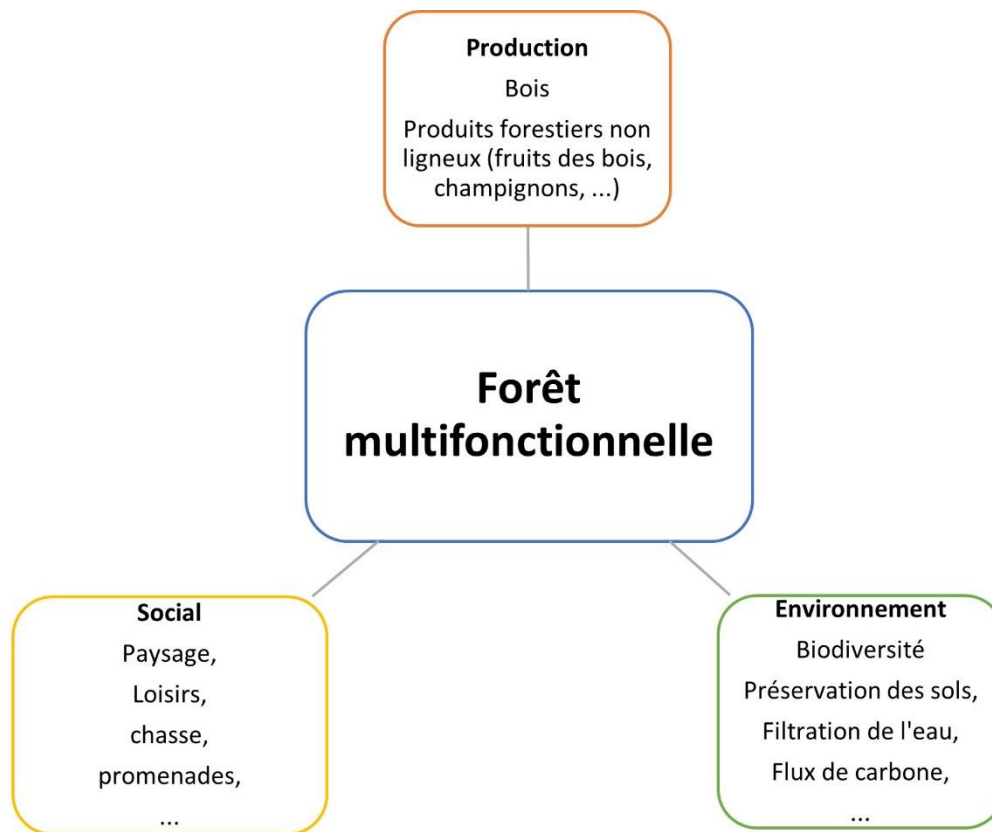


Figure 1. Les trois facettes d'une forêt multifonctionnelle

1.2.1. Le rôle économique des voiries forestières

« La voirie forestière est un des éléments permettant la bonne mobilisation des bois » (Colson et al., 2011). En effet, malgré une demande en bois de plus en plus importante, une partie de notre capital ligneux reste inexploité notamment en raison de la difficulté d'accès aux parcelles. Ce réseau de voiries forestières est crucial car il a un impact direct sur les distances de débardage et de débusquage et donc sur le coût total des opérations d'exploitation. De fait, en 1993, Dominique Normandin estimait que « par unité de volume et de distance, le transport sur les coupes (débusquage) est 2 à 20 fois plus coûteux que le transport par tracteur sur des pistes aménagées (débardage), qui est lui-même 50 à 100 fois plus onéreux que le transport routier par camion » (Normandin, 1993). Bien que les machines ne cessent d'évoluer et de s'améliorer en termes de productivité, leur prix d'achat a également augmenté ce qui justifie toujours cette différence importante, en termes de coûts, entre ces types de transport. Il est à noter que le coût des opérations dans un peuplement n'est pas uniquement imputable aux types de machines utilisées ou à la voirie, il dépend également de la taille de la parcelle ou du type de peuplement. Il est recommandé que, pour une propriété, la distance de débardage soit au maximum de 500m, avec une distance optimale de 200m. Au-delà de cette distance, la propriété est considérée comme non-desservie (CRPF Nord - Pas de Calais Picardie, 2005). D'après Nivelles et al. (1988), la densité idéale de voirie accessible aux grumiers de l'ordre de 25 à 27 mètres par hectare.

Les voiries forestières permettent également le stockage du bois et le chargement des grumiers dans des endroits sécurisés à l'abri des axes fortement fréquentés (Colson et al., 2011). En parallèle de l'exploitation des bois, un accès facilité des hommes et des machines dans un peuplement favorise une gestion durable et efficace de celui-ci (Normandin, 1993).

Ainsi, une forêt bien desservie a généralement plus de valeur qu'une forêt éloignée de tout accès. Selon le CRPF Hauts-de-France, l'estimation économique d'une propriété forestière bien desservie peut être supérieure de 300 à 400 €/ha par rapport à une forêt mal desservie (CRPF Nord - Pas de Calais Picardie, 2005).

1.2.2. Le rôle environnemental des voiries forestières

Les voiries forestières ont de nombreux impacts sur l'environnement qui les entoure. Ceux-ci peuvent être positifs ou négatifs.

Contrairement à ce qu'on pourrait croire, les routes et les chemins forestiers ont un impact positif sur la biodiversité lorsqu'ils sont gérés de manière adéquate. En effet, par exemple, « l'ouverture sur une grande largeur participe à la création d'une mosaïque de peuplements ouverts et fermés » (CRPF Nord - Pas de Calais Picardie, 2012). Ainsi, des milieux ouverts intra forestiers voient le jour suite à la création de routes forestières. De plus, les espèces végétales, telles que les graminées, qui se retrouvent dans des milieux ouverts nouvellement créés, constituent une source supplémentaire d'alimentation pour les espèces animales. Ces nouveaux milieux ouverts créés peuvent donc servir de zones de gagnage pour le gibier et dès lors le maintenir éloigné des essences forestières de production et de la régénération naturelle. Ce rôle n'est pas anecdotique ! En effet, bien que 95% des arbres soient estimés sans dégâts, dans la commune de Nassogne, la seconde cause de dégâts après ceux liés à l'exploitation en forêt, sont ceux réalisés par le gibier (frottage et écorcement) (Service public de Wallonie, 2013).

« Les dégâts d'abroustissement sur hêtre et d'écorcement / frottement sur épicéa sont les plus courants ; des essences comme le frêne, le saule, le chêne, l'érable sycomore, le sorbier des oiseaux, et le bouleau (dans une moindre mesure) sont régulièrement abroustées si elles ne sont pas protégées. » (Service public de Wallonie, 2013)

Un des rôles majeurs pour l'environnement des routes forestières est la préservation des sols par la concentration du tassement des passages répétés des machines à certains endroits dédiés. Bien que peu considéré depuis l'avènement des machines agricoles et forestières, le sol est une des composantes fondamentales dans la sylviculture qui remplit des fonctions vitales pour l'arbre (ONF et al., 2009). En effet, il assure notamment :

- « Un support physique dans lequel s'enracinent les arbres ;
- Un réservoir dans lequel la végétation puise l'eau et les éléments nutritifs dont elle a besoin ;
- Un habitat pour une flore et une faune très variées ainsi que des microorganismes décomposeurs qui permettent le recyclage des matières organiques et en conséquence le fonctionnement des écosystèmes forestiers. » (ONF et al., 2009)

La conséquence majeure de l'exploitation forestière sur le sol est le tassement. Ce phénomène entraîne une série de conséquences négatives pour les arbres telles qu'une diminution de la porosité du sol, un compactage du sol ou encore une diminution de la diversité des espèces liées au sol (ONF et al., 2009). Ceci entraîne pour l'arbre une diminution de l'accessibilité en eau du sol, des problèmes de stabilité liés à l'enracinement physique, des situations d'hypoxie voire d'anoxie pour les racines ou encore une diminution nette de l'activité de la faune et de la microfaune du sol qui met à mal le cycle biologique, qui entraîne des carences en certains minéraux ou éléments chimiques.

Le tassement du sol est la conséquence directe du passage d'engins forestiers - qui exercent une pression très importante sur le sol. « Le tassement est la diminution de volume d'un sol sous l'effet d'une surcharge, par expulsion d'eau interstitielle ou réarrangement de sa texture » (ONF, 2017). Ce problème fondamental qui émerge dans le monde agricole et forestier est connu pour entraîner des conséquences très importantes puisque ces pressions peuvent s'exercer jusqu'à 70 cm de profondeur. Cette conséquence est d'autant plus marquée que la portance du sol est moindre. En effet, il y a un tassement du sol si la pression exercée par la roue est supérieure à la portance du sol. C'est d'ailleurs pour cette raison qu'on évite d'exploiter lorsque les sols sont humides ou en période hivernale quand le sol est saturé (ONF et al., 2009).

Tableau 1. Pouvoir porteur en fonction du type de sol. (Source : Guide Prosol (ONF et al., 2009))

Type de sol	Pouvoir porteur (en bars)	Type de sol	Pouvoir porteur (en bars)
Neige fraîche	0,1 – 0,3	Gravier	3 – 8
Marais	0,1 – 0,4	Neige tassée	4 – 8
Limons détrempe	0,2 – 0,6	Argile sèche	4 – 12
Argile molle	0,5 – 1,5	Roche compacte	125
Sable tassé	3 – 8		

Dès lors, la création et l'entretien d'un réseau de voiries forestières développé, couplés à la présence de cloisonnements d'exploitation disposés de façon idéale, permettent aux engins forestiers de circuler dans les massifs en concentrant leurs passages sur ces lieux qui y sont dédiés. En effet, il est préférable de concentrer le passage des véhicules sur une superficie réduite, aménagée à cet effet, plutôt qu'aléatoirement sur l'ensemble du peuplement. On estime en effet que 80% à 90% du tassement du sol intervient entre le 1^{er} et le 3^{ème} passage d'engins (ONF et al., 2009). En limitant le passage des machines aléatoirement au sein des peuplements, on diminue aussi les dégâts sur les arbres, tel qu'illustré en figure 2.

Il est toutefois utile de noter qu'un excès de routes et de chemins pourrait favoriser une fréquentation abusive des massifs et perturberait les zones de quiétude de la faune sauvage (ONF, 2021).



Figure 2. Photo montrant des dégâts sur un arbre en bordure de chemin forestier

1.2.3. Le rôle social des voiries forestières

Dans la gestion multifonctionnelle de la forêt, les voiries forestières jouent un rôle très important dans le contexte social. En effet, elles influencent de manière directe la fréquentation de la forêt et donc l'attrait des gens pour celle-ci.

A la jonction entre le rôle environnemental et social, les paysages ainsi que la naturalité se retrouvent impactés par la présence des voiries forestières. De fait, bien que la présence de routes ou de chemins influence directement l'aspect écologique du paysage, elle influence également, de manière indirecte, la fréquentation du public. Le projet INTERREG AGRETA a également été lancé dans ce sens, afin de renforcer l'attractivité touristique des paysages d'Ardenne.

Ce projet, mené durant quatre années au sein de 14 zones distinctes au sein du massif forestier ardennais, cible les attentes et les points importants du public ainsi que des opérateurs touristiques vis-à-vis de la forêt. D'après les chiffres qui ont été récoltés durant ce projet, le grand public ainsi que les opérateurs touristiques accordent une part très importante à l'esthétique de la forêt, au rôle des forêts en faveur de la biodiversité ou encore dans le maintien d'un cadre de vie idéal. Force est de constater que les fonctions économiques remplies par la forêt ne sont pas en tête des attentes du public en général (Breyne et al., 2021). Également dans ce sens, 69% du grand public et 75% des opérateurs touristiques sont favorables à un accès limité du public afin de préserver les espaces naturels (Breyne et al., 2021).

Ensuite, d'un point de vue social, la voirie forestière facilite la pratique de sports ou autres loisirs. Parmi les activités les plus fréquentes, on retrouve la promenade de détente, les grandes randonnées, le VTT ou encore la course à pied (Breyne et al., 2021). Il est évident que toutes ces activités sont liées à la présence de chemins ou de sentiers.

1.3. Les types de dégâts fréquemment rencontrés sur les voiries

Le rôle des voiries forestières étant d'accueillir un public large et les véhicules y étant associés, elles doivent faire face, lorsque les conditions ne sont pas idéales, à des dégradations. Rotaru (1985) détaille notamment les deux types de dégâts les plus fréquemment rencontrés en forêt.

1.3.1. L'orniérage

Les ornières sont les « traces profondes que laissent les roues d'un véhicule dans les chemins de terre » (Académie française, 2021). Théoriquement, une ornière est la réunion d'un creux et de deux bourrelets latéraux (voir figure 3) (Rotaru, 1985). L'orniérage est forcément précédé d'un tassement du sol puisqu'il s'agit d'une diminution, au niveau du passage des roues, du volume du sol sous l'effet d'une surcharge. « Une ornière peut se

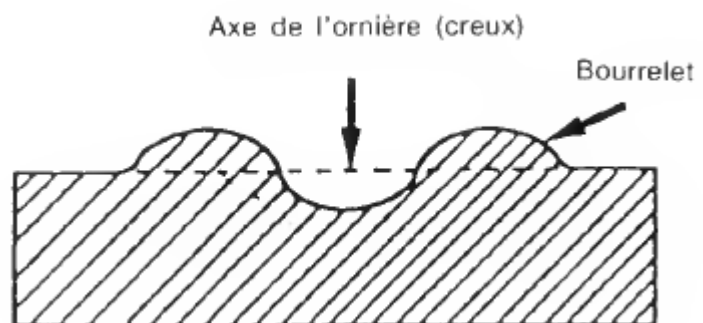


Figure 3. Schéma d'une ornière. (Source : Rotaru, 1985)

former dès le premier passage d'engin, le plus souvent sur un sol saturé en eau, ou après plusieurs passages sur un sol moins humide. Selon la texture du sol, cela peut aussi se produire sur un sol sec (par exemple sur des sols sableux) moyennant un nombre de passages plus élevé. » (ONF, 2017)

Effet de l'orniérage : diminution de la praticabilité moteur et pédestre.

1.3.2. Le scalpage

Le scalpage est le « déplacement et souvent mélange de matériaux suite à une contrainte appliquée majoritairement selon une direction tangentielle à la surface du sol (patinage des roues motrices, glissement latéral ou dérapage). Appelé aussi en terme mécanique *cisaillement*. » (ONF et al., 2009)

Effet du scalpage : arrachage et destruction de la couche supérieure du sol et des racines (Rotaru, 1985)

1.4. Le passage de véhicules

L'accès sécurisé aux massifs forestiers doit être aménagé pour plusieurs types de véhicules, en fonction des besoins de la zone concernée et des aménagements déjà en place. Les infrastructures à mettre en place varient donc en fonction du type de véhicule concerné. En effet, il est facilement imaginable qu'un accès dédié au passage d'un véhicule tout-terrain doit répondre à moins de critères qu'un accès dédié au passage de grumiers ou de véhicules légers, ceux-ci étant soit de dimensions beaucoup plus importantes soit non munis d'équipements leur permettant de faire face à des terrains abîmés.

1.4.1. Les caractéristiques d'un grumier

Pour répondre aux contraintes de dimensions fixées dans le code de la route, les camions forestiers ont une largeur maximale de 2,55 m, une hauteur maximale de 4 m et une longueur maximale de 18,75 m. En Région wallonne, la masse maximale à ne pas dépasser pour les véhicules articulés ou les trains routiers est de 44 tonnes (Code de la route.be, 2021a).

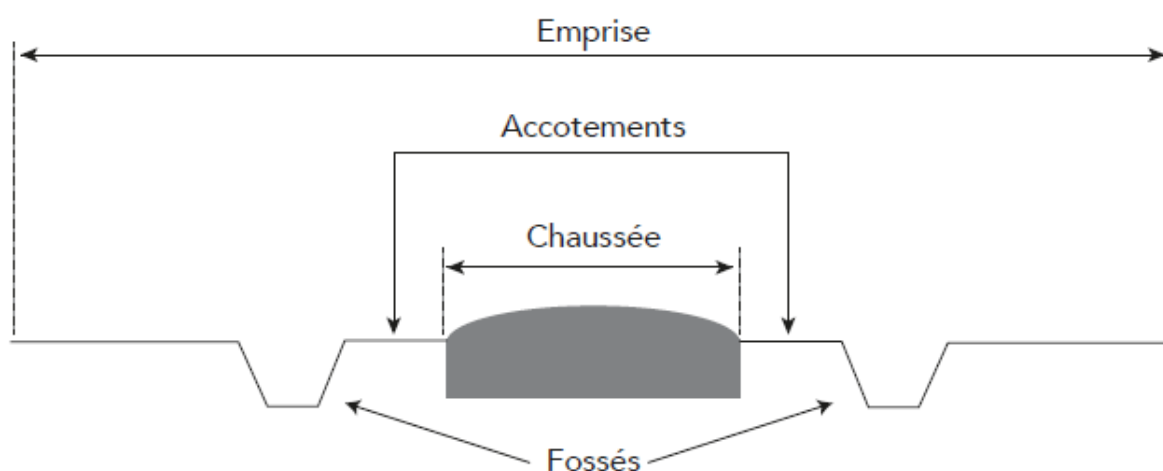


Figure 4. Schéma d'une voirie forestière. (Source : Pro Bos, 2020)

Afin d'assurer des conditions optimales au transport grumier, il est conseillé d'assurer une hauteur de passage de 4,5 m et une largeur de bande de roulement de 4 m. Il est également préconisé d'aménager une plateforme d'une largeur d'environ 7 m. Celle-ci reprend la bande de roulement, ou chaussée et les accotements (FIBRA (Fédération forêt-bois Rhône-Alpes), 2017). Si ces chiffres sont appliqués à la figure 4, on obtient une largeur de chaussée égale à 4 mètres et des accotements d'une largeur de 1,5 m de part et d'autre de la chaussée.

1.4.2. L'accès aux voiries forestières

Même s'il s'agit d'un sujet très rarement traité, la jonction entre le réseau routier public et les massifs forestiers est une composante essentielle à prendre en compte dans l'élaboration et la sécurisation d'un réseau de dessertes forestières (Pro Bos, 2020b). En France, à la fin des années 1990, les chiffres ont montré une nette augmentation des accidents impliquant des engins agricoles lors de leur chargement ou de leur transport. Faute d'accès sécurisés et de zones de chargement suffisantes, les agriculteurs étaient contraints de charger leur convoi à même les routes, ouvertes à la circulation publique (Pro Bos, 2020b). Bien qu'il ne s'agisse pas de la même pratique et du même type d'exploitation, on imagine que l'activité forestière puisse être impactée identiquement par ce manque de sécurité. De fait, la demande en bois étant grandissante et la vente de bois en bord de route étant de plus en plus fréquente (Pro Bos, 2020b), la sécurisation des accès forestiers est devenue un élément clé dans la mobilisation des bois wallons. Dans ce sens, le projet Forêt Pro Bos, qui prend part au sein du programme Européen INTERREG France-Wallonie-Flandres, détaille les éléments importants à intégrer lors de l'analyse des accès et des voiries.

1.4.3. Dimensionnements idéals d'une voirie forestière

Tel que détaillé dans le point ci-dessus, les voiries doivent être dimensionnées en fonction des types de véhicules. Malheureusement, aucune réglementation claire et générale n'existe en Wallonie à ce propos. Ce paragraphe décrit les dimensionnements théoriques idéaux et les réglementations régionales rencontrées en France.

Outre la largeur de la chaussée et des accotements, il est également important de prévoir une largeur d'emprise suffisante, idéalement de 15 m. Cette large emprise permet d'accueillir les éléments nécessaires à la stabilité de la voirie et à son état. Elle permet notamment à la voirie d'être suffisamment ensoleillée et d'éviter une humidité excessive et des routes humides, beaucoup plus sensibles au tassement ou aux autres dégâts (CRPF Nord - Pas de Calais Picardie, 2012).

Dans le cadre du projet Forêt Pro Bos, il a été déterminé que la largeur de la bande de roulement d'un chemin ou d'une route forestière destinée à accueillir un ensemble routier est de minimum 3 mètres. L'idéal serait même de doubler cette largeur afin que des véhicules puissent se croiser facilement, et à défaut prévoir des surlargeurs² (voir figure 6) afin de sécuriser au maximum le convoi (Pro Bos, 2020a). Théoriquement, un véhicule devrait pouvoir stationner sans entraver la circulation. Le schéma ci-contre illustre l'aménagement idéal d'une voirie forestière et de son accès (voir figure 5). Le schéma inclut également une barrière, qui est une obstruction fréquemment rencontrée au début des chemins forestiers afin de dissuader le public d'emprunter les voiries privées ou destinées aux personnes autorisées. Ce type d'obstruction sera détaillé par la suite. De façon similaire, la Fédération Nationale des entrepreneurs des Territoires demande des chemins empierrés d'une largeur de quatre mètres pour permettre l'accès aux camions grumiers. Elle demande également des espaces de croisement « camion-véhicule » tous les 400m, si la largeur de la voirie ne permet pas à deux véhicules de se croiser (Fédération Nationale Entrepreneurs Des Territoires, 2012). De façon plus contraignante, le gouvernement des Bouches-du-Rhône, en France, a également pris des mesures liées aux infrastructures et aux équipements de lutte contre les incendies de forêt. Ces mesures mettent également l'accent sur la largeur des routes forestières, d'une largeur optimale de 6 mètres. Lorsque ceci est impossible pour des raisons techniques, le gouvernement impose des aires de croisement (voir figure 6) tous les 200 mètres, qui sont représentées par une largeur localisée de la voirie égale à 6 mètres et par une longueur égale à 45 mètres (Préfet des Bouches-du-Rhône, 2014).

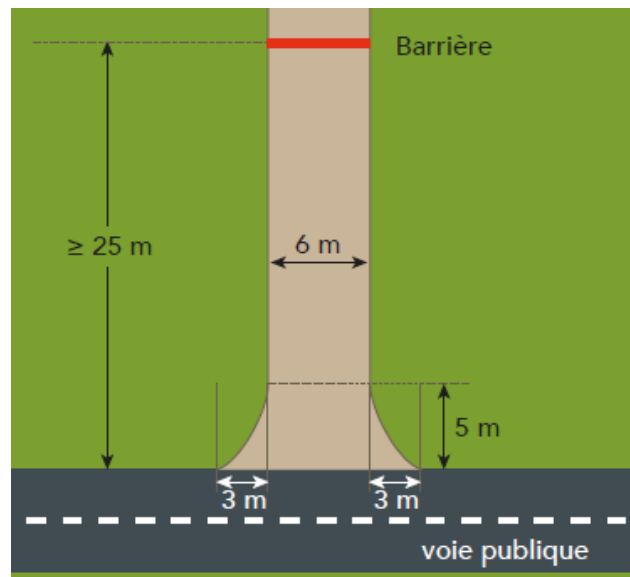


Figure 5. Schéma idéal d'une voirie débouchant sur une route publique (Source : Pro Bos, 2020)

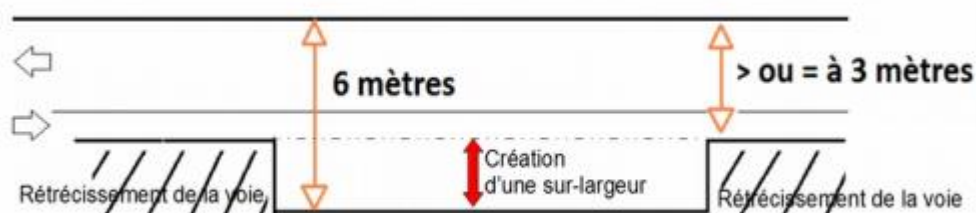


Figure 6. Aire de croisement le long de la voirie. (Source : Préfet des Bouches-du-Rhône, 2014)

Indépendante de la largeur de la bande de roulement, la largeur d'entrée de l'accès doit également répondre à des critères de dimensionnement afin de permettre aux véhicules de manœuvrer en toute sécurité, de préserver les infrastructures de l'accotement mais également sans encombrer la circulation sur la voie publique. Ainsi, il est recommandé de créer des entrées d'une largeur supérieure ou égale à 12 mètres (voir figure 5).

² Augmentation localisée de la largeur d'une chaussée (dans un virage par exemple) (Editions Eyrolles, 2021)

En résumé, la largeur optimale d'une chaussée, en forêt, destinée aux grumiers est de 6 mètres lorsque cela est possible. Le cas échéant, la largeur minimale à retenir est de 3 mètres à laquelle sont couplées des surlargeurs permettant le croisement de véhicules. De façon optimale, toute l'infrastructure liée à un chemin forestier doit présenter une emprise d'une quinzaine de mètres de large afin de lui assurer une bonne stabilité et un besoin en lumière suffisant pour ainsi éviter des conditions humides, propices à des dégradations plus rapides de la voirie.

1.4.4. Autres infrastructures composant la desserte forestière

Pour reprendre la définition donnée par FIBRA (Fédération forêt-bois Rhône-Alpes (2017), la desserte forestière désigne les différents aménagements utilisés pour la gestion des forêts, c'est-à-dire les routes forestières, les places de dépôt ou encore les places de retournement.

Les **places de dépôt** permettent le stockage des bois et sont accessibles aux camions pour charger les bois débordés (ONF, 2017). Elles sont strictement destinées à l'entrepôt des bois en attente de chargement et n'ont donc pas besoin d'être empierrées (Pro Bos, 2020). Cependant, elles sont bien entendu liées à la présence de places de chargement, qui sont, elles, empierrées. Idéalement, les places de dépôt sont dimensionnées afin d'avoir une capacité de stockage équivalente à trois grumiers, soit environ 100 m³, celles-ci doivent également être accessibles par tous temps et leurs surfaces doivent être comprises entre 300 et 800 m² (Pro Bos, 2020a).

Ensuite, des **places de retournement** doivent également faire partie du réseau de dessertes forestières. Elles permettent aux véhicules longs de type grumier de faire demi-tour lorsque la voie est sans issue ou lorsque sa qualité ne permet pas au véhicule de continuer son chemin. Idéalement, il faudrait une place de retournement, couplée à une place de dépôt pour 10 à 25 hectares (Pro Bos, 2020a) de forêt. La Fédération nationale entrepreneurs des territoires les jugent même indispensables lorsque la longueur de la voie dépasse 400 m (Fédération Nationale Entrepreneurs Des Territoires, 2012).

Ces deux infrastructures complémentaires peuvent être aménagées de plusieurs façons, en fonction des caractéristiques du lieu. On retrouve quatre cas distincts :

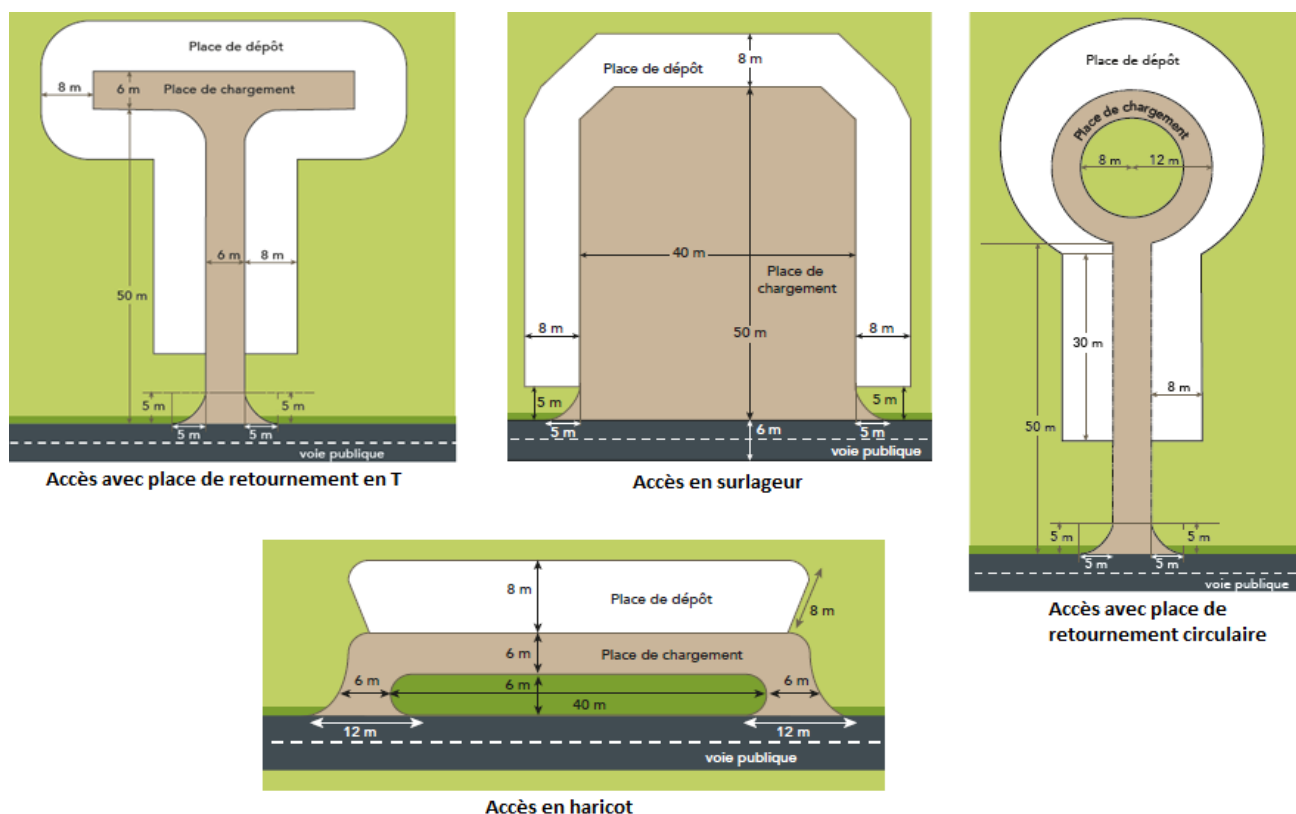


Figure 7. Schémas illustrant les différents cas possibles pour l'aménagement des places de dépôt et de retournement. (Source : Pro Bos, 2020)

1.5. Utilisation des outils de guidage

Outre la présence d'une desserte de qualité, une bonne connaissance de celle-ci facilite la circulation au sein des massifs forestiers. Pour aider à cette connaissance, à l'ère du digital, les outils de guidage en tous genres sont présents dans notre vie quotidienne et sont facilement accessibles sur les plateformes de téléchargement. Cependant, on ne retrouve pas, en Wallonie, d'outils dédiés spécialement au transport forestier.

Pourtant, comme le souligne l'institut technologique FCBA, « la desserte forestière est un enjeu stratégique pour le développement de la filière forêt-bois ». Pour exploiter durablement la forêt et sécuriser l'approvisionnement de nos industries, il est essentiel que les massifs soient accessibles (FCBA, 2021). Dès lors, le FCBA a mis en évidence l'intérêt de développer un outil pour visualiser et rassembler les informations concernant la desserte pour le transport de bois. Ainsi, en partenariat avec l'IGN, ils ont développé un outil nommé « Naviforest ». Il s'agit d'un « service en ligne gratuit permettant de visualiser, créer et modifier des informations et des données spécifiques au transport des bois » (NaviForest.fr, 2021). Ce système est présent sur le territoire français, à l'échelle nationale.

Pour remédier à ce manque en Wallonie, des outils existent. C'est notamment le cas de pgRouting. Celui-ci a pour but de fournir des fonctionnalités de routage sur base de données géospatiales (OSGeo, 2021). Bien qu'il n'ait pas encore été utilisé dans l'élaboration d'un outil de guidage pour le transport du bois, les fonctionnalités de cet outil ont déjà été mises en avant de manière satisfaisante. En effet,

Singh et al. (2015) ont utilisé pgRouting dans la création d'itinéraires de fuite dans la région de l'Asie du Sud-Est. Cette région du monde étant fréquemment sujette à des catastrophes naturelles, les auteurs se sont penchés sur une manière de fournir aux habitants un itinéraire pour fuir une zone sinistrée, en évitant les zones impraticables. Dans l'optique d'une utilisation dans le transport du bois, comme c'est le cas de Naviforest, il serait intéressant de tester cet outil qui pourrait servir de base à l'élaboration d'un outil de guidage.

1.6.Objectifs du travail

L'objectif global de ce travail est de réaliser une étude complète du réseau de dessertes forestières à l'échelle de la commune de Nassogne et de valoriser ces données dans l'élaboration d'un outil d'aide à la navigation dédié au transport de bois par grumiers. Afin de rencontrer cet objectif global, deux objectifs spécifiques ont été retenus.

Le premier objectif spécifique a été de réaliser une étude approfondie du réseau de dessertes forestières, à l'échelle de la commune de Nassogne, sur base des données disponibles sur OpenStreetMap. Plus précisément, une analyse spatiale a été réalisée pour vérifier la précision géométrique des données et pour mettre en avant les zones peu desservies. En complément, des vérifications de terrain ont été faites pour vérifier la typologie et l'exhaustivité des données.

Le second objectif spécifique de ce travail vise à utiliser les données géographiques dans l'élaboration d'un outil de guidage grâce à l'extension pgRouting. De façon complémentaire, une application de guidage a été élaborée à l'échelle du territoire qui entoure la commune de Nassogne.

2. Matériel et méthodes

2.1. Zone d'étude

La commune de Nassogne, située dans la province de Luxembourg, couvre une superficie de 11 196 hectares et compte environ 5420 habitants, soit une densité de population de 48,4 habitants/km². Elle regroupe les villages de Ambly, Bande, Charneux, Chavanne, Forrières, Grune, Harsin, Lesterny, Masbourg et Nassogne. La faible densité de population témoigne d'une commune très peu urbanisée avec une dominance de terres agricoles et forestières. En effet, selon le Plan communal de développement de la nature, les terres non urbanisées dépassent 90% de la superficie communale (Commune de Nassogne, 2016). Plus précisément, les forêts couvrent 53% du territoire communal tandis que les terres agricoles en couvrent 37%.

En ce qui concerne les surfaces forestières, celles-ci sont situées en majorité dans le sud et le sud-est de la commune.

Au niveau du territoire bioclimatique, la commune de Nassogne se situe à cheval sur la Famenne et sur l'Ardenne. La Famenne couvre la majeure partie située au Nord-ouest de la commune, avec une bande située en Calestienne, tandis que le reste de la commune est situé sur le territoire ardennais où se concentrent la majorité des surfaces forestières.

Sur le plan géologique, les sols sont principalement limono-caillouteux avec une charge schisteuse ou schisto-gréseuse. Tel que mentionné ci-dessus, une partie du territoire communal se situe en Calestienne, synonyme de sols avec une charge calcaire. La légende complète des principaux types de sols en Wallonie se trouve en annexe 3.

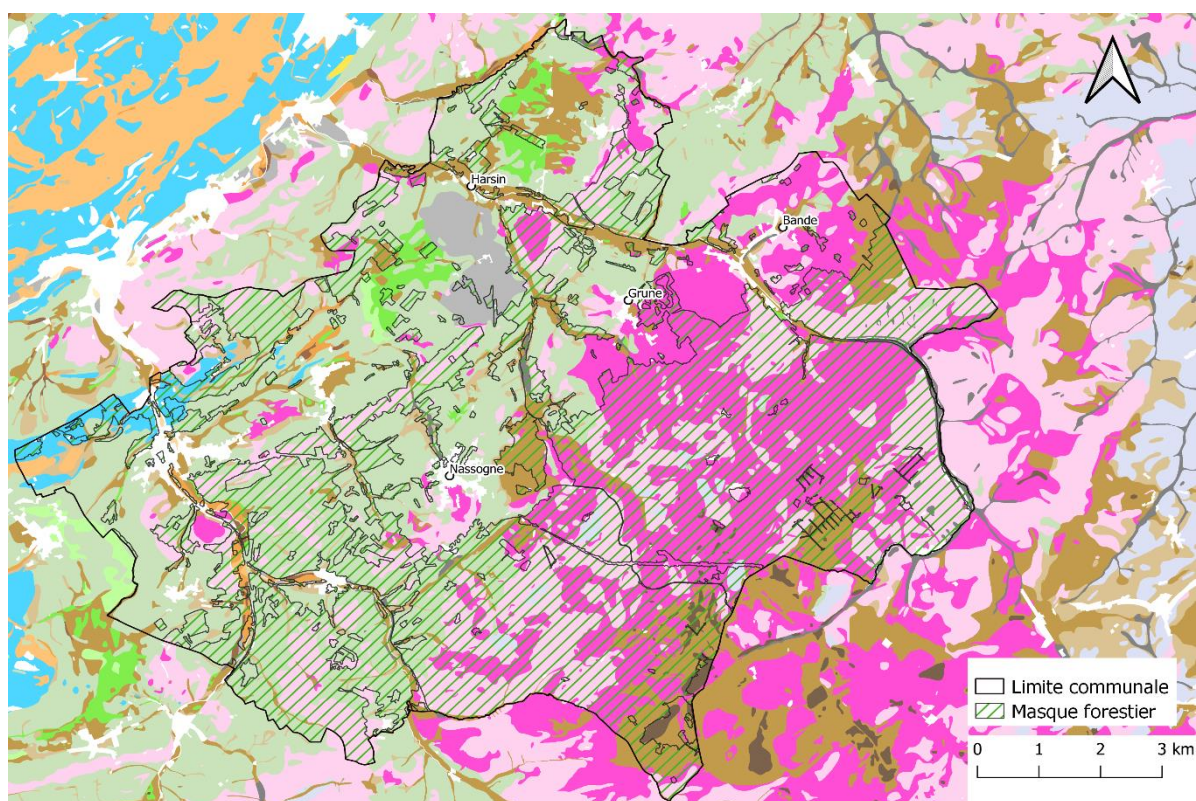


Figure 8. Carte des principaux types de sols sur la commune de Nassogne

Le relief est assez prononcé au sein de la commune et est très marqué autour des cours d'eau. L'altitude est également un facteur très changeant au sein de la commune puisqu'elle passe d'environ 220 m dans le Nord-ouest de la commune à plus de 550 m dans le sud. Cette forte différence d'altitude est le signe du changement de région bioclimatique, pour passer de la Famenne à la haute-Ardenne. Les principales caractéristiques climatiques de la commune de Nassogne sont : un total de précipitations égal à 980 mm par an, une température moyenne annuelle de 9,1°C, des températures maximales moyennes pouvant aller jusqu'à 22,4°C en juillet et des températures minimales moyennes pouvant aller jusqu'à -1,1°C en février (IRM, 2021).

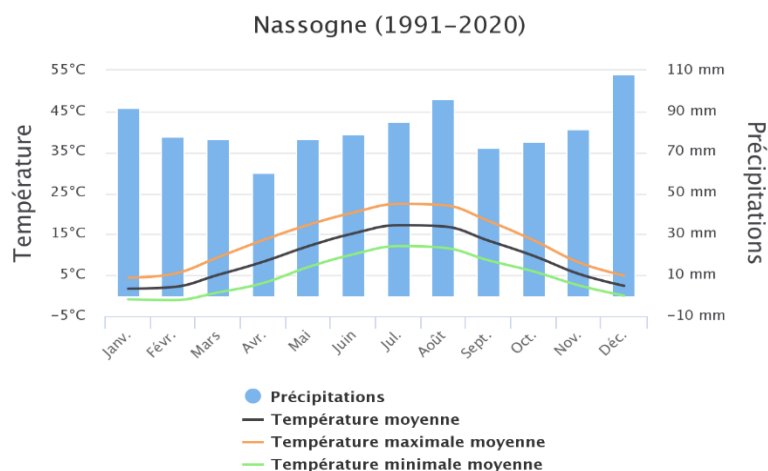


Figure 9. Climat de la commune de Nassogne ces 30 dernières années. (Source : IRM)

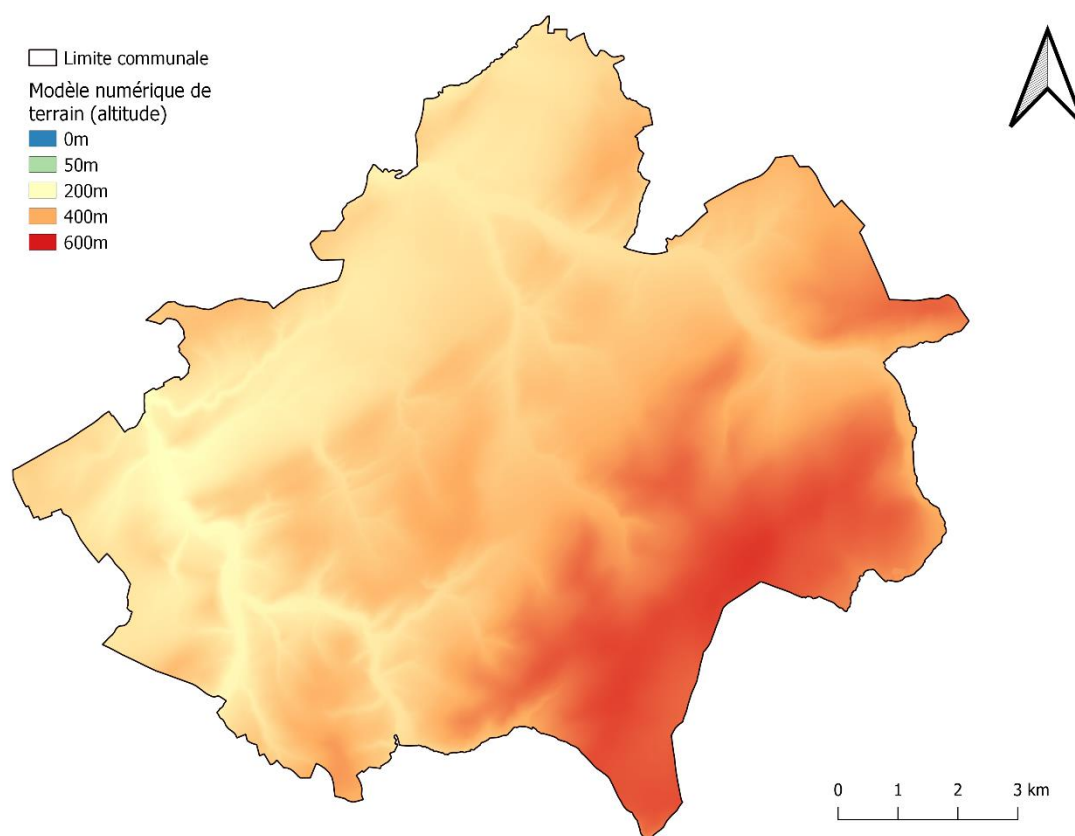


Figure 10. Carte du modèle numérique de terrain (MNT) sur la commune de Nassogne

Du point de vue hydrographique, la commune de Nassogne fait partie du bassin versant de la Lesse et compte trois rivières principales à savoir la Lhomme, la Wamme et la Masblette. Le réseau hydrographique est relativement développé.

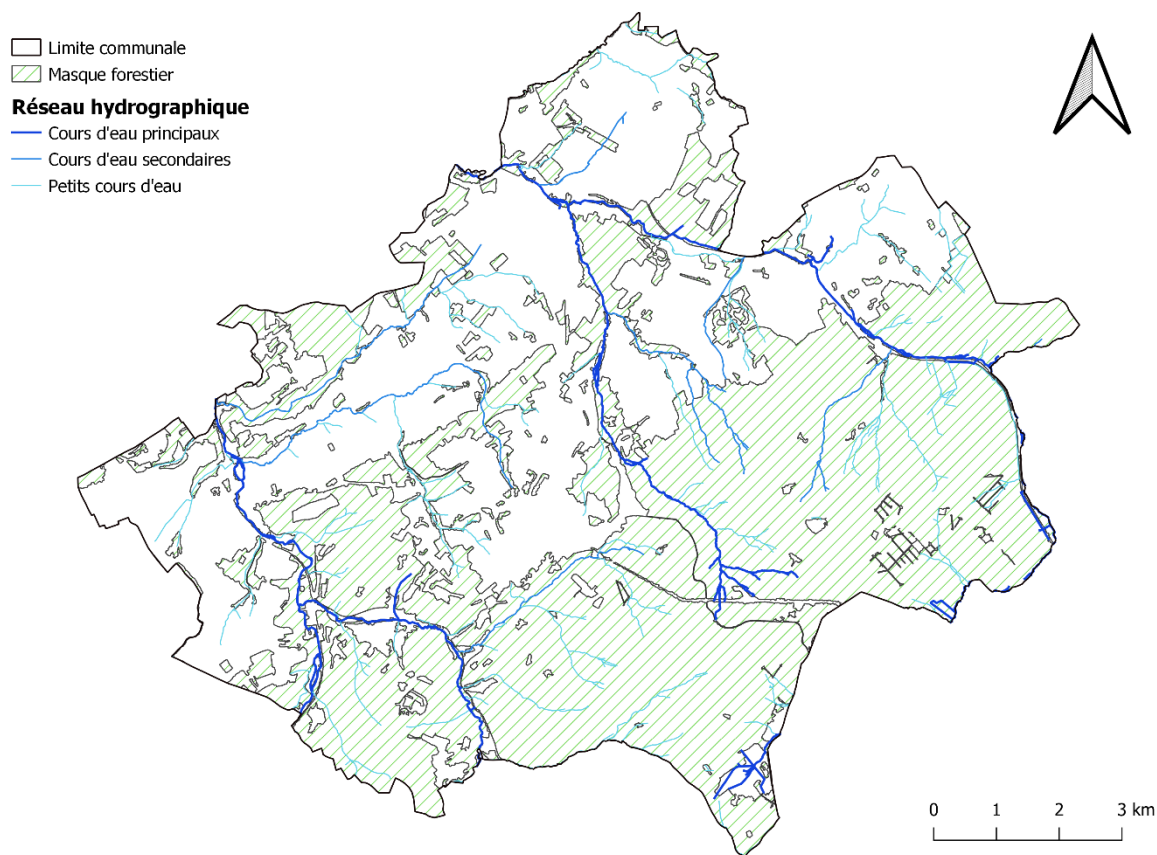


Figure 11. Réseau hydrographique de la commune de Nassogne

2.1.1. Zones Natura 2000

Les zones Natura 2000 au sein de la commune présentent une surface totale non négligeable de 3 177 hectares. L'unité de gestion temporaire 03 (hêtraies à luzule et autres feuillus non différenciés) représente à elle seule 1 951 hectares, soit plus de 60% de la superficie totale des unités Natura 2000. La seconde unité de gestion la mieux représentée en termes de surface est l'UG 10 (forêts non indigènes de liaison) avec environ 690 hectares.

Au niveau de la gestion de ces zones, il est légitime de regrouper les UG 08 (forêts indigènes de grand intérêt biologique) avec les UG temporaire 03 car les mesures à appliquer sur ces dernières, lorsqu'elles sont en zones forestières, sont équivalentes à celles des UG 08. Regroupées, ces unités de gestion représentent presque 66% de la superficie totale des zones Natura 2000 présentes dans la commune de Nassogne.

A partir des données calculées et sur base des données SIG de la couverture forestière, on remarque facilement que les zones Natura 2000 couvrent majoritairement des zones forestières. En effet, près de 94% du réseau N2000 de la commune de Nassogne couvrent des surfaces boisées. 43% de la surface forestière est donc classée en zone N2000. Ceci sera un élément non négligeable, à prendre en compte, lors de projets d'amélioration ou de création de dessertes forestières. De fait, dans le cas des mesures à

appliquer dans le cadre des forêts indigènes de grand intérêt biologique (UG 08), des modifications du relief du sol sont interdites et certains autres travaux sont soumis à autorisation (Natagriwal, 2017).

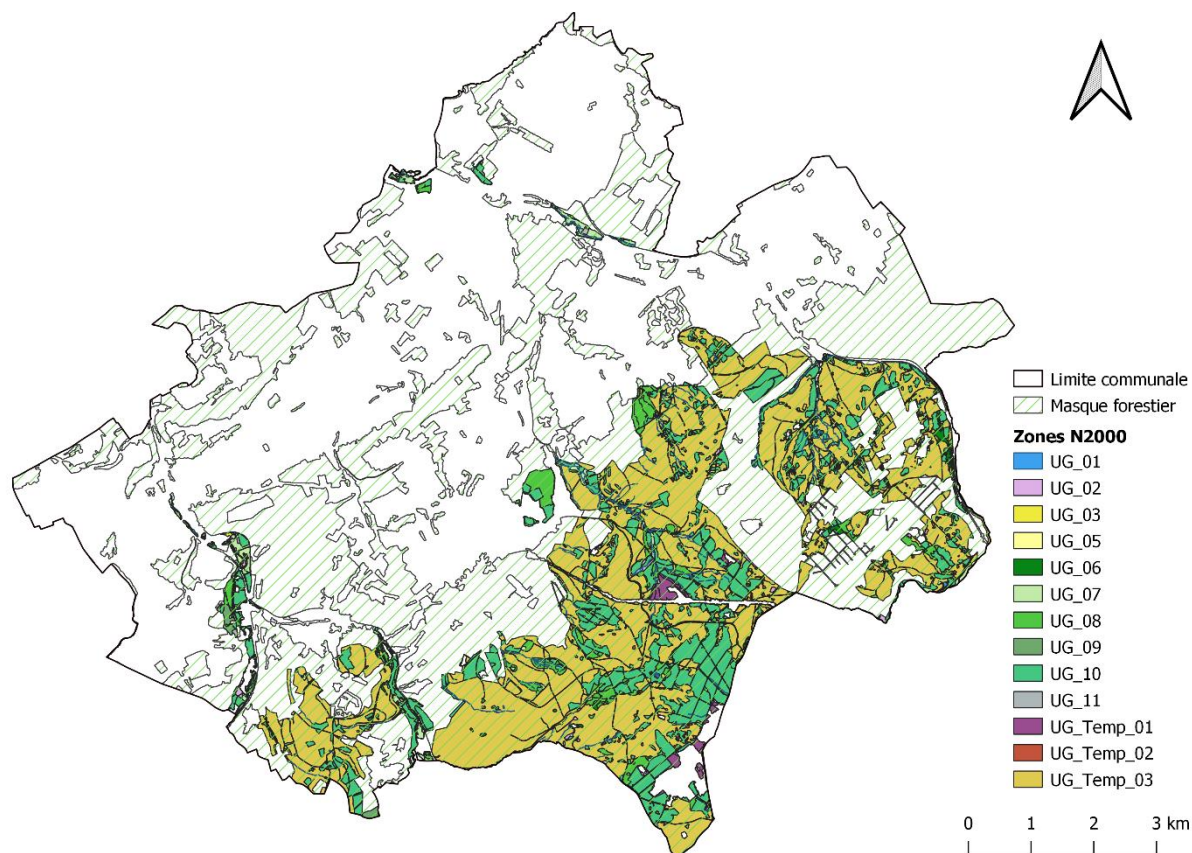


Figure 12. Zones Natura 2000 présentes en forêt

2.1.2. Propriétaires forestiers

Au total, la superficie forestière de la commune de Nassogne est de 6 575 hectares. En termes de propriété, 55% de cette surface, soit 3 618 hectares, sont des forêts publiques où la majorité appartient à la commune. En effet, les forêts communales représentent ici 92% des forêts publiques tandis que les forêts domaniales ne couvrent que 261 hectares, soit seulement 7%. Une infime partie appartient à d'autres établissements publics. A l'inverse, les forêts privées couvrent 3 060 hectares, soit 45% de la surface forestière totale. L'étendue de ces forêts privées a été obtenue à partir de la différence entre la surface forestière totale et les forêts détenues par les pouvoirs publics.

Au niveau géographique, on remarque que la majorité des forêts publiques se trouvent dans le sud de la commune sous la forme d'un massif presque unique. A l'inverse, les forêts privées sont beaucoup plus morcelées et dispersées dans le reste de la commune.

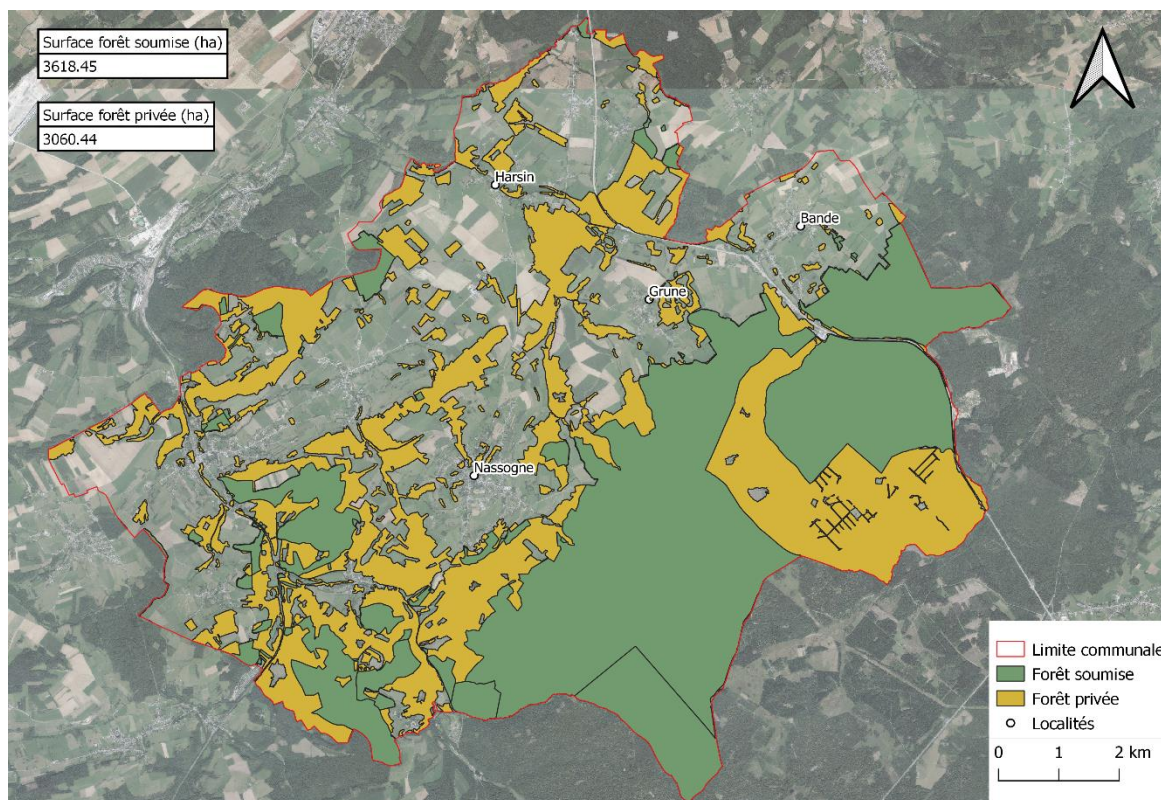


Figure 13. Structure des propriétés forestières dans la commune de Nassogne

2.1.3. Structure et composition de la forêt

Les massifs forestiers présents sur la commune de Nassogne sont composés à 60% de feuillus, à 37% de résineux, le reste de la surface forestière correspond à des coupes. Cette information a été calculée sur base d'une couche créée dans le cadre du projet INTERREG Grande-Région Regiowood II (Nink, 2017). L'application Forestimator développée par Gembloux Agro Bio-Tech permet également de faire la distinction entre les peuplements résineux et les peuplements feuillus (Gembloux Agro Bio-Tech, 2021).

La forêt communale est principalement composée de trois essences, à savoir le hêtre (30%), le chêne (28,1%) et l'épicéa (23,8%). Les 18,1% restants sont représentés par le Douglas (4,2%), le pin sylvestre (2,3%), le bouleau (2,4%) ou encore par d'autres essences feuillues et résineuses (Service public de Wallonie, 2013).

En ce qui concerne le traitement et la structure des peuplements en forêt publique, le secteur productif est très largement dominant (94%). Dans celui-ci, on retrouve principalement un système d'entretien des peuplements feuillus en futaie irrégulière (2 000 hectares, soit 61,2%) et un entretien des peuplements résineux en futaie régulière (962 hectares, soit 29,4%). On retrouve de façon plus anecdotique des futaies résineuses traitées en Pro Silva ou qui vont être transformées en forêts feuillues ainsi que des taillis composés majoritairement de chênes (Service public de Wallonie, 2013).

2.2. Utilisation des données LiDAR

Le LiDAR est une technologie très régulièrement utilisée dans le cadre forestier, notamment dans l'aménagement des ressources forestières (Evans et al., 2006). Plus précisément, il s'agit « d'une technique de mesure à distance du relief qui peut prendre plusieurs formes ». Dans le cas de la Wallonie, les données ont été recueillies entre février 2013 et mars 2014. La moyenne de points obtenus est de 2,58 points/m² (Géoportail de la Wallonie, 2021).

A partir des données recueillies par le vol LiDAR, plusieurs couches cartographiques ont pu être créées. Parmi ces couches, plusieurs ont été utilisées dans le cadre de ce travail.

C'est notamment le cas du Modèle numérique de terrain (MNT). Plus précisément, « Un MNT est une représentation de l'altitude du sol d'une zone déterminée et **exclut** tous les éléments situés à la surface du sol (bâtiments, ponts, végétation, ...). Cette donnée raster fournit une information sur l'altitude du sol en tout point du territoire wallon. » (Service public de Wallonie, 2021b)

Une seconde couche possible à générer directement est le modèle numérique de surface (MNS). A l'inverse du MNT, le « modèle Numérique de Surface (MNS) est une représentation de l'altitude d'une zone déterminée et **inclut** tous les éléments situés à la surface du sol (bâtiments, ponts, végétation, véhicules, etc.). Cette donnée raster fournit une information sur l'altitude (Z) en tout point du territoire wallon » (Service public de Wallonie, 2021c).

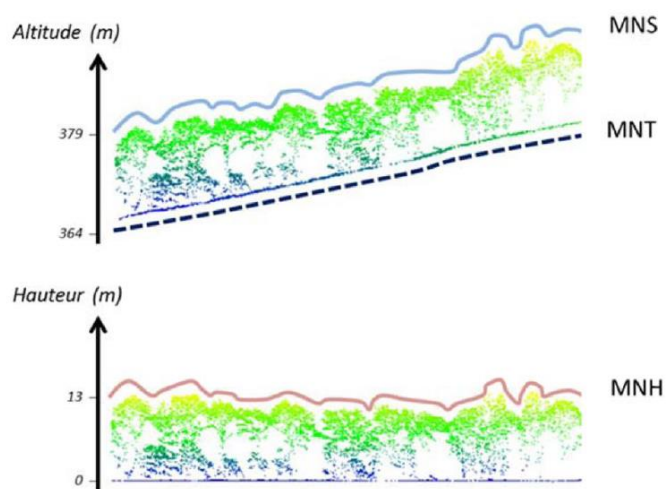


Figure 14. Modèle numérique de hauteur à partir du MNS et du MNT.
(Source : Lejeune, 2017)

La figure 14 illustre la différence entre les couches MNT et MNS. La couche qui résulte de la différence entre ces deux couches se nomme modèle numérique de hauteur (MNH). Cette dernière sert notamment à estimer la hauteur de la végétation sur une zone donnée.

2.3. Les données OpenStreetMap

Mise en place durant l'année 2004, la base de données géographiques OSM est un projet de cartographie collaboratif qui a connu un essor important puisqu'elle enregistre aujourd'hui plus de cinq millions d'utilisateurs (Vargas et al., 2020). Dans la même optique que Wikipédia, les internautes peuvent endosser un rôle d'éditeur afin de compléter ou d'améliorer les données déjà existantes. Pour ce faire, certains procèdent en se basant sur des images satellitaires ou, lorsque celles-ci ne sont pas de qualité suffisante, utilisent des données récoltées à l'aide d'un récepteur GPS.

2.3.1. Précision géométrique des données OpenStreetMap

Bien que cette base de données OpenSource et collaborative présente de nombreux avantages, l'interprétation sur base d'images ou grâce à des récepteurs GPS peut engendrer des imprécisions. De fait, des images de mauvaise qualité ou mal géoréférencées peuvent parfois induire en erreur les utilisateurs. De même, la réception de données GPS peut parfois être biaisée en fonction de l'appareil utilisé ou de l'environnement. Selon Garmin, leurs récepteurs GPS fournissent en général, dans des conditions idéales, une précision de l'ordre de cinq à dix mètres et s'étend jusqu'à quinze mètres dans 95% des cas (Garmin Ltd, 2021).

Depuis sa mise en place, plusieurs études ont tâché de comparer la précision géométrique d'OpenStreetMap par rapport à des données de référence. C'est notamment le cas d'une étude menée en 2010 par J-F Girres et G.Touya, qui ont comparé la précision des données OSM par rapport aux données fournies par l'IGN, en France. A cette époque, la différence de position moyenne entre ces deux bases de données était de 6,65 m, avec une concentration de valeurs comprises entre 2,5 et 10 m. Une autre étude, menée deux ans plus tard par O. Petit, P. Billon et J-M Follin dans le département de la Sarthe, a mis au jour une grande hétérogénéité entre les différentes communes du département. La cause probable de cette hétérogénéité est la qualité du travail du contributeur, mais également le nombre de contributeurs. Un nombre élevé d'acteurs sur une petite zone engendre une correction des données et donc des données plus précises. A l'inverse, si les données émanent d'un unique contributeur, dont les données sont biaisées pour les raisons évoquées plus haut, il se peut qu'on observe une erreur significative. Également dans cette étude, il est apparu que les sources d'écart les plus importants proviennent des autoroutes et des routes piétonnes. Ceci peut être expliqué, dans le premier cas, par une largeur de route importante et donc un mauvais centrage de la part des éditeurs et dans le second cas, par un phénomène de masque plus important provoqué par les rues étroites en centre-ville et par la végétation parfois plus abondante dans les zones rurales (Petit et al., 2012).

Pour estimer la précision géométrique de la couche de voiries disponible sur OSM, nous avons choisi d'utiliser différentes couches décrivant le relief du territoire wallon. Outre le fait que le MNT apporte de l'information quant à l'altitude du pixel sélectionné, il est possible, à partir de cette couche, de générer une nouvelle couche d'ombrage (*hillshade* en anglais) (voir figure 15). Celle-ci est utilisée pour donner un effet de relief à la carte. Cette couche permet donc de mieux apprécier le relief du territoire et d'ainsi mettre en avant les routes et chemins qui se distinguent par des courbes plus ou moins visibles en fonction de l'emprise et de l'état de ceux-ci.

Afin d'accentuer encore la visibilité cartographique des voiries, QGIS dispose de plusieurs outils de calcul. C'est notamment le cas de la fonction « rugosité », qui met en avant le degré d'irrégularité d'une surface (voir figure 15). Pour ce faire, la rugosité est calculée « par la plus grande différence entre les cellules d'un pixel central et ses cellules environnantes » (Documentation de QGIS, 2021).

Les deux couches présentées ci-dessous permettent de visualiser clairement les routes et chemins et serviront à mesurer la précision des données OSM. Pour ce faire, 250 points ont été générés le long des chemins repris dans la banque de données OSM, afin de les comparer avec des points désignés, au même niveau, sur les chemins visibles repris sur les couches hillshade. Pour le calcul de la distance entre les points, l'extension « Nearest neighbour join (NNjoin) », disponible sur QGIS, a été utilisée. Comme son nom l'indique, cette extension permet de déterminer la distance entre les points les plus proches répertoriés sur deux couches distinctes.



Figure 15. Comparaison entre une couche hillshade classique (gauche) et une couche hillshade retravaillée avec la fonction "rugosité" (droite). Zoom sur une zone de la commune de Nassogne

2.3.2. Exhaustivité et typologie des données OpenStreetMap

Afin de pouvoir se baser sur OpenStreetMap, il est important de vérifier la précision géométrique des données mais également l'exhaustivité et la concordance entre les données disponibles sur internet et les réalités de terrain.

Concernant l'exhaustivité des données, il s'agit de vérifier si l'ensemble des routes, chemins et sentiers sont repris au sein de la base de données. En 2012, l'étude menée par Petit et al. (2012) concluait que « l'exhaustivité est le talon d'Achille d'OSM ». Cependant, un autre résultat de l'étude attire l'attention : l'évolution du réseau routier OSM entre les années 2011 et 2012. De fait, à cette époque OpenStreetMap n'était pas encore très connu du grand public et les technologies de type smartphones n'étaient pas encore où elles en sont aujourd'hui.

Ensuite, une étude menée par Brovelli et al. (2016), soit quatre ans plus tard, dans la ville de Paris, montre que la longueur totale du jeu de données OSM est plus long de 438 kilomètres que celui de la base IGN. Ceci laisse donc présager que l'exhaustivité des données OSM ne cesse de s'améliorer au fil des années, grâce au nombre croissant de contributeurs, à tout le moins en ville.

Au niveau de la typologie, c'est-à-dire, les dénominations et les attributions données aux routes et chemins repris sur OpenStreetMap, Petit et al. (2012) démontraient que la sémantique était identique à 71% entre les données OSM et celles du RGE³ de l'IGN.

³ Référentiel à grande échelle

Pour vérifier à la fois l'exhaustivité et la typologie, il est nécessaire de comparer les données disponibles sur OSM pour la commune de Nassogne avec celles reprises lors de sorties de terrain. Pour ce faire, 25 points ont été générés aléatoirement le long de chemins repris sur OSM et autour desquels une vérification de terrain a été faite. Celle-ci s'est faite grâce au plug-in Qfield.

Ainsi, un formulaire type a été préparé au préalable sur le logiciel QGIS et chargé sur un smartphone grâce à l'application Qfield qui permet l'édition hors-ligne des couches. Ce formulaire reprend :

- la classification de la voirie (type de chemin) ;
- le revêtement de la voirie ;
- l'état de la voirie ;
- la largeur de la voirie ;
- d'éventuelles remarques.

La largeur de voirie a été ajoutée au formulaire afin d'identifier les chemins accessibles aux véhicules larges tels que les grumiers. Il s'agit d'un élément déterminant car la largeur minimale pour une voirie destinée à ces véhicules est de 3 mètres. Une éventuelle corrélation entre le type de voirie et la largeur de chaussée pourrait être mise en évidence. Cette mesure a été prise à l'aide d'un double décimètre de la marque Stanley.

2.4. Cartographie des voiries

L'analyse cartographique qui a été réalisée dans le cadre de ce travail s'est faite grâce au logiciel de système d'information géographique libre et Open Source QGIS. Les versions 2.18 et 3.10 ont été utilisées.

Pour l'analyse cartographique du réseau de voiries forestières, le projet de cartographie collaboratif et Open Access OpenStreetMap (OSM) est un bon point de départ. En effet, celui-ci détaille le type de route rencontrée en fonction de son infrastructure et de son importance, mais fait également la distinction entre plusieurs types de chemins, classifiés en fonction de leur revêtement. Cette base cartographique est donc un allié précieux dans ce type de projet.

Dans la littérature d'information sur OSM, on retrouve une typologie allant des voies les plus importantes, en termes d'infrastructure et de fréquentation, aux voies les moins importantes (OpenStreetMap Wiki, 2021). En tête de liste se situent donc les autoroutes, suivies par les nationales importantes, les routes résidentielles, les chemins et enfin les sentiers.

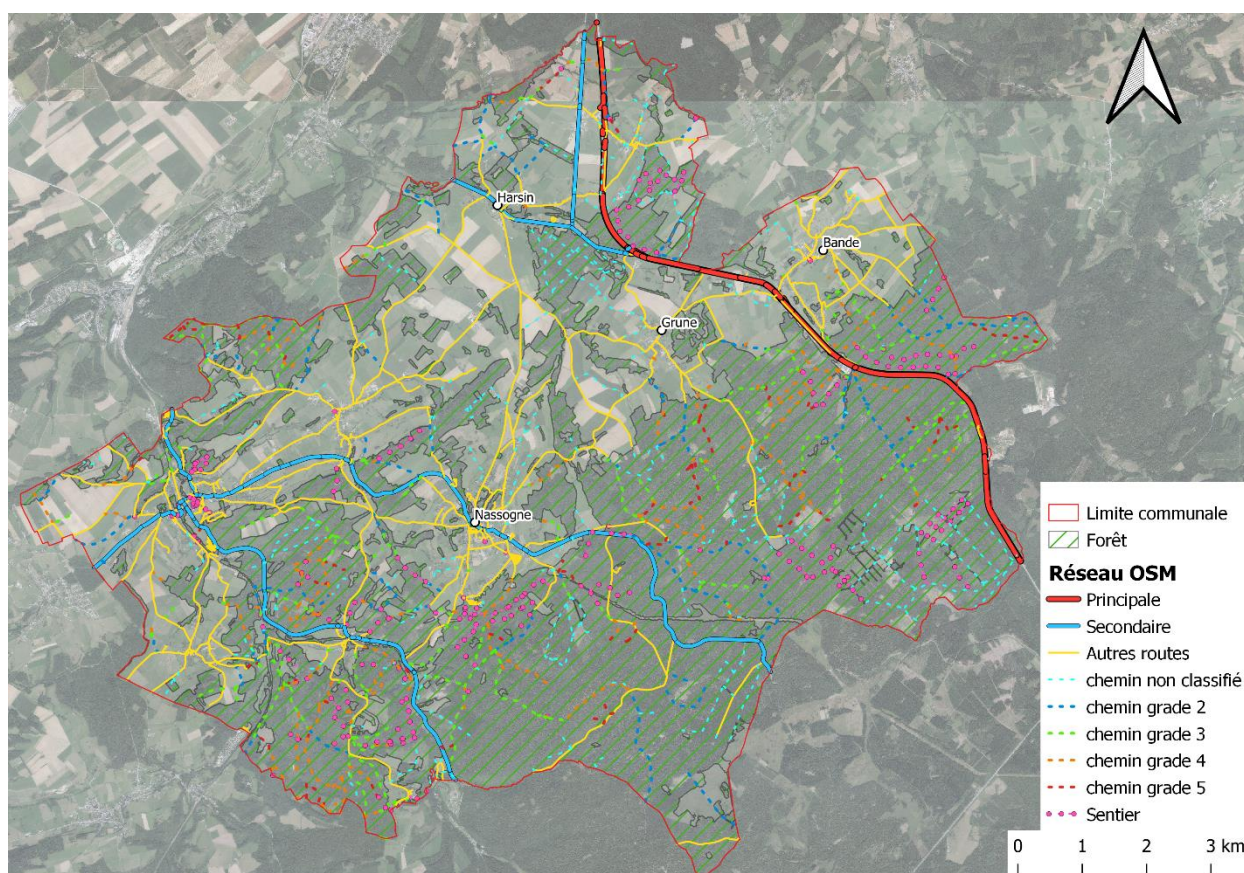


Figure 16. Réseau de voiries OSM sur la commune de Nassogne

Plus précisément, les routes majeures sont classées en fonction de leur importance dans le réseau routier. Les routes reliant de grandes villes seront donc classées différemment que les routes reliant de petits hameaux. Cependant, dans le cas où on s'intéresse à la desserte forestière, les axes de circulation routière de second plan ont été regroupés plus simplement, sous la catégorie « autres routes ». Inversement, les chemins caractérisés par la valeur « track » sur OSM seront classifiés en fonction de leur revêtement tel que c'est déjà le cas sur OpenStreetMap. Le tableau ci-dessous reprend la classification précise utilisée dans ce travail.

Tableau 2. Classification cartographique de la desserte forestière, sur base d'OpenStreetMap

Classification OSM	Classification simplifiée (Utilisée dans ce travail)	Description
Routes		
Trunk	Principale	Voie rapide, en général avec 2x2 bandes
Secondary	Secondaire	Route faisant partie du réseau régional, reliant de petites villes
Tertiary	Autres routes	Routes reliant des villages
Unclassified		Voie de desserte locale qui est relativement peu fréquentée
Residential		Route au sein d'une zone résidentielle
Track_grade1		Surface possédant un revêtement dur de type asphalte ou composée de matériaux très compactés.
Chemins		
Track	Chemin non classifié	Chemin carrossable en principe sans revêtement hydrocarboné (non classé)
Track_grade2	Chemin grade 2	Surface compacte recouverte de graviers (éléments solides)
Track_grade3	Chemin grade 3	Surface qui présente un mélange entre des éléments solides et non solides
Track_grade4	Chemin grade 4	Surface majoritairement composée de végétation avec des traces d'éléments solides
Track_grade5	Chemin grade 5	Surface comportant des marques de passages de véhicules avec une empreinte visuelle presque nulle
Sentier		
Path	Sentier	Voie adaptée uniquement au passage de personnes

2.5. Cartographie des accès

Pour constituer un réseau de dessertes optimal et accessible aux véhicules, l'inventaire et l'analyse des accès sont essentiels. Un accès étant défini comme la connexion entre le réseau routier public et tout ou une partie d'un massif forestier, il s'agit donc de l'intersection entre les routes et les chemins. Grâce à la fonction « intersections de lignes » disponible sur QGIS, 170 points correspondants aux accès ont été générés.

Pour cartographier et décrire ces accès, le projet Forêt Pro Bos a mis au point une fiche correspondant au relevé de terrain pour le diagnostic d'un accès. Sur base de cette fiche, un formulaire de description a été mis en place grâce à l'extension Qfield disponible sur QGIS. Cet outil est un allié précieux pour ce type de travail car il permet l'édition hors-ligne de cartes et donc un traitement facilité et rapide. Ce formulaire reprend :

- le revêtement ;
- le type de véhicule pouvant emprunter l'accès ;
- la largeur d'entrée de l'accès ;
- une éventuelle obstruction ;
- l'état de l'accès (dégradation) ;
- la visibilité à gauche et à droite.

De la même manière que pour la largeur de voirie, la largeur d'entrée de l'accès a été mesurée à l'aide d'un double décamètre de la marque Stanley. Quant à la visibilité, celle-ci a été jugée à partir d'une mise en situation visant à identifier les éventuelles obstructions (panneaux de signalisation, végétation, conformation de la route, ...).

2.6. Cartographie des autres éléments de la desserte forestière

En parallèle des voiries, la desserte forestière comprend d'autres éléments essentiels indispensables à son fonctionnement. C'est le cas des aires de stockage et des quais de chargement.

Par définition, ces aires de stockage sont des zones qui servent à stocker les bois qui sont dans l'attente d'être chargés par un grumier.

Les quais de chargement, eux, visent à accueillir les grumiers. A la différence des aires de stockage, les quais de chargement doivent être empierrés afin que les grumiers puissent circuler dans de bonnes conditions.

Idéalement, les aires de stockage devraient être couplées aux quais de chargement afin de faciliter le chargement des grumiers tout en laissant les chemins libres d'accès. En effet, il est fréquent que les bois soient stockés le long des chemins dans l'attente d'être embarqués. De cette manière, les chemins se retrouvent régulièrement bloqués le temps de chargement des grumiers. Les auteurs du projet Forêt Pro Bos estiment qu'il faudrait, de manière optimale, une place de stockage couplée à un quai de chargement pour une surface de 10 à 25 hectares (Pro Bos, 2020a). Dans le cadre de ce travail, les aires de stockage couplées à des quais de chargement ont été regroupées sous le terme de quai de chargement et les places de dépôt temporaire fréquemment sollicitées, le long des chemins, sous le terme d'aire de stockage.

Pour répertorier ces éléments de desserte, plusieurs moyens ont été mis en place. Le premier consistait à relever ces emplacements lors des visites de terrain grâce au logiciel Qfield. Le second moyen a été de contacter les agents de triage responsables de la commune de Nassogne. Ceux-ci m'ont alors indiqué la localisation de ces différents éléments. Enfin, une photo-interprétation a été réalisée à partir d'orthophotos et d'une couche émanant du DNF reprenant les éléments du « réseau de transport » de la forêt communale.

En parallèle de ces infrastructures qui composent la desserte forestière, les intersections entre les cours d'eau et les voiries ont été répertoriées. En effet, il s'agit d'un élément important à prendre en compte car le fait de circuler sur les berges, les digues ainsi que dans le lit des cours d'eau dans le cadre d'une activité d'exploitation forestière peut engendrer des dégâts sur le milieu et est donc soumis à une autorisation auprès du DNF (code forestier, 2021). Suite à l'analyse de ces points d'intersection, et grâce aux fonds de cartes IGN et OSM, les intersections où sont présentes des infrastructures permettant le passage de véhicules (pont, dalot, ponceau, ...) ont été enlevées. A l'inverse, les intersections catégorisées comme « gué » ou non catégorisées par l'IGN ont été gardées et mises en avant comme « points d'attention ».

2.7. Analyse approfondie de la structure des peuplements forestiers

Dans le but de créer un outil d'aide à la décision⁴ dans le cadre d'une éventuelle amélioration de la desserte forestière au sein de la commune de Nassogne, il est important d'étudier plus en profondeur le massif forestier dans lequel on se trouve. En effet, d'après les auteurs de Pro Bos (2020b), la configuration des places de dépôt est différente en fonction du type d'essence concerné.

Pour ce faire, il est nécessaire d'analyser la composition et la structure des peuplements qui composent la zone d'étude. Dans le cas de la commune de Nassogne, on se retrouve principalement face à deux modèles de gestion : d'une part, la futaie irrégulière feuillue, majoritairement composée de hêtres et de chênes indigènes, et d'autre part, la futaie régulière résineuse, composée majoritairement d'épicéas.

Dans ce travail, l'accent a été mis sur l'analyse de la structure des peuplements composés par des essences de production, à savoir les essences résineuses. Celles-ci ont la particularité de se présenter sous la forme de peuplements réguliers équiens issus de plantations. Ces peuplements sont donc souvent monospécifiques, font partie de la même classe d'âges et présentent des caractères morphologiques semblables (hauteur, circonférence, ...). L'étude de la structure des peuplements forestiers, dans la commune de Nassogne, s'est donc faite sur les parcelles constituées d'essences résineuses, délimitées par les données du projet Regiowood II. L'essence résineuse largement majoritaire sur la commune de Nassogne étant *Picea abies*, seule celle-ci sera considérée.

Afin de visualiser les différences de hauteur au sein des parcelles résineuses préalablement identifiées, on peut utiliser le modèle numérique de hauteur (MNH). Celui-ci est le résultat de la différence entre le modèle numérique de surface (MNS) et le modèle numérique de terrain (MNT).

⁴ Type d'outil qui est conçu pour aider un décideur à visualiser des données et prendre la décision la plus adéquate possible (OSEYS, 2021).

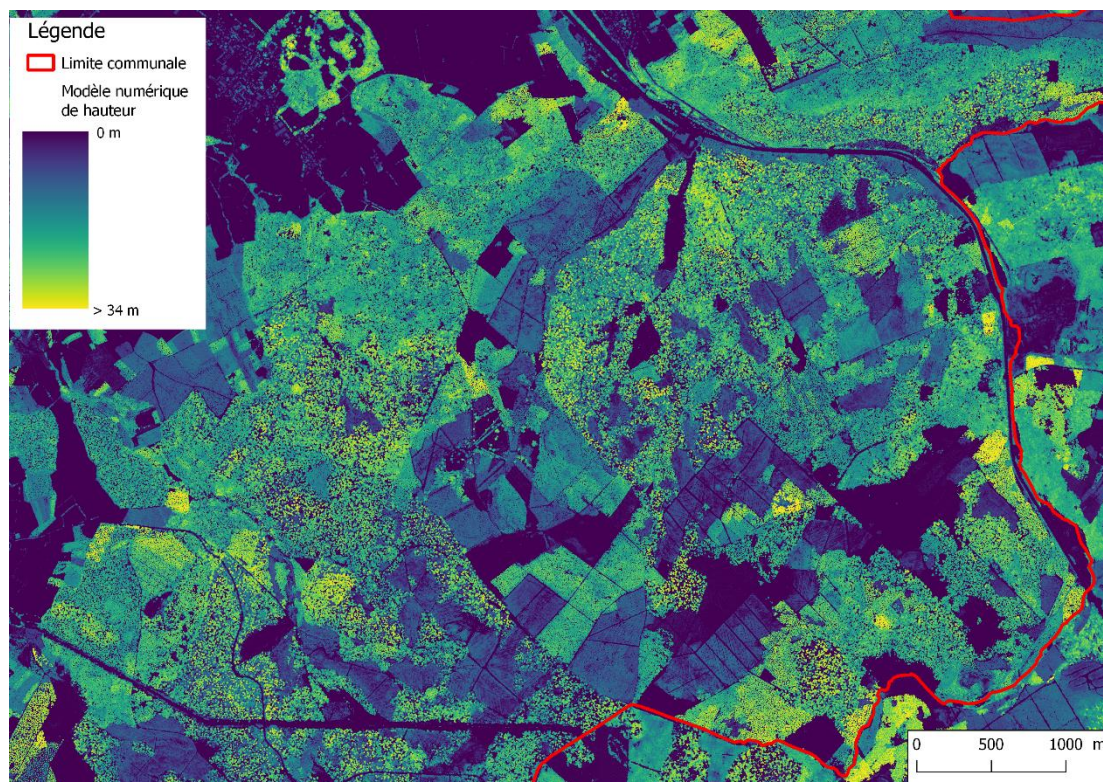


Figure 17. Modèle numérique de hauteur basé sur les données LiDAR 2013-2014

Mis à part le type d'essence présent sur un territoire donné, le volume de bois qui doit y transiter est également un élément crucial à prendre en compte pour une configuration et un dimensionnement idéal des quais de chargement. Ce capital ligneux, sous forme de bois sur pied, peut être estimé à partir des hauteurs calculées, et plus précisément des hauteurs dominantes. Celles-ci sont des hauteurs moyennes relatives au peuplement, mais qui concernent une certaine catégorie d'arbres, un étage ou un nombre déterminé de sujets. De plus, la hauteur dominante varie de manière assez continue dans le temps, ce qui, à l'inverse des hauteurs moyennes habituelles, lui permet d'être une bonne expression de la croissance du peuplement (Rondeux, 2021). Plus précisément, la hauteur dominante mathématique sera employée ici. Elle correspond à la hauteur moyenne d'un nombre déterminé d'arbres parmi les plus gros ou les plus hauts (Rondeux, 2021).

Afin de calculer la hauteur dominante sur une surface désignée, QGIS dispose d'un plugin nommé « ForEstimator » qui a été développé par Gembloux Agro Bio-Tech. Initialement, ce plugin avait été mis au point pour permettre aux gestionnaires et propriétaires forestiers de calculer facilement la hauteur dominante de leurs peuplements d'épicéas et de douglas équiens (Dedry et al., 2015).

Le but ici étant d'étudier le volume de bois sur pied d'épicéas qui transitera sur l'ensemble du territoire de la commune de Nassogne, la superficie totale des peuplements résineux a été divisée en utilisant les parcelles cadastrales. Les parcelles cadastrales de très grandes dimensions ont été séparées en plusieurs polygones afin de tenir compte, au mieux, des disparités en termes de hauteur, au sein de ces mêmes parcelles cadastrales.

Afin d'estimer le volume de bois sur pied à l'hectare (VHA), deux formules existent en Wallonie pour l'épicéa. La première formule est issue des tarifs de cubage sur des peuplements d'épicéas en Ardenne méridionale (Rondeux, 1977). Cette relation a été estimée à partir d'un échantillonnage sur 300 placettes de 4 ares chacune.

$$VHA = -54,43650 + 2,59570 * GHA + 2,00900 * HDOM + 0,32115 * GHA * HDOM$$

La seconde formule est issue de l'ouvrage « Cubage des arbres et des peuplements forestiers : tables et équations » de (Dagnelie et al., 2013), où :

$$VHA = -30,281 + 1,1279 * GHA + 1,5296 * HDOM + 0,3922 * GHA * HDOM$$

Pour le calcul d'estimation du volume par hectare (VHA) dans les peuplements résineux, la surface terrière a été fixée à 35 m²/ha. Cette valeur générale a été utilisée car elle reflète une valeur moyenne en termes de surface terrière, pour les pessières wallonnes. Elle constitue également une valeur repère à atteindre dans la sylviculture de l'épicéa en Wallonie. Plus précisément, on donne en général des valeurs idéales qui se situent entre 30 et 35 m²/ha.

2.8. Outil de guidage dédié aux grumiers

La mise en place de l'outil de guidage dédié aux véhicules longs de type grumier, a été réalisée sur base des données OpenStreetMap, grâce à l'outil pgRouting, disponible sur le système de gestion de bases de données PostgreSQL. Le logigramme ci-dessous reprend de manière synthétique les différentes étapes à suivre pour la mise en place de l'outil de guidage.

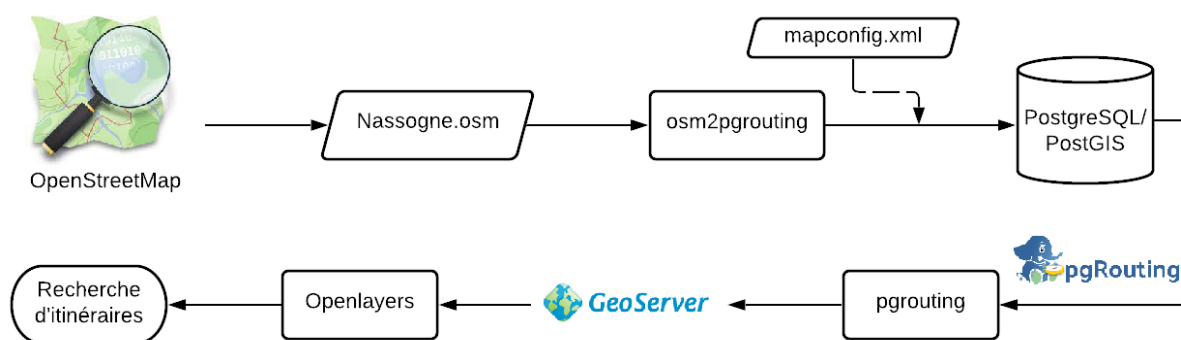


Figure 18. Processus pour la mise en place d'un outil de guidage

2.8.1. Obtention des données

Les données sont issues du site internet Openstreetmap.org, où elles sont téléchargeables pour la zone désirée. Dans ce cas-ci, la zone étudiée s'étend sur la commune de Nassogne ainsi que sur les communes voisines. Elle représente une surface totale approximative de 62 000 hectares.

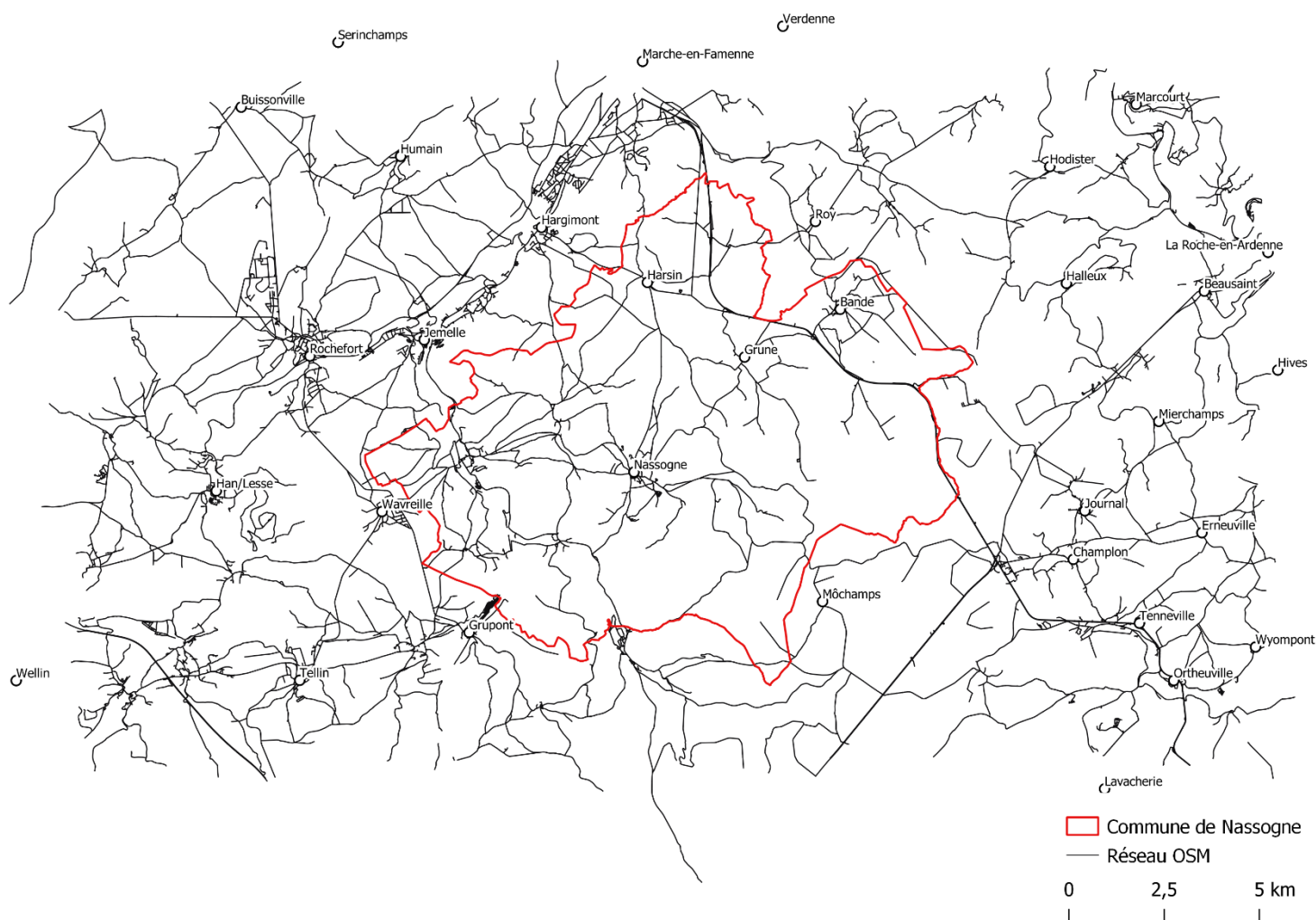


Figure 19. Zone du réseau de voiries OSM prise en compte dans l'élaboration de l'outil de guidage

2.8.2. Osm2pgRouting

L'extension pgRouting, détaillée ci-après, reprend également un outil permettant de charger les données au format .osm directement sur la base de données PostgreSQL, en tenant compte des exigences de pgRouting. Cet outil, nommé osm2pgRouting, a l'avantage d'organiser les données pour qu'elles soient utilisables rapidement. Le chargement des données OSM sur la base de données PostgreSQL par osm2pgRouting se fait à partir de l'invité de commandes de l'ordinateur. A partir des données brutes, l'outil crée deux couches shapefile dénommées « ways » et « ways_vertices_pgr ». Ce dernier reprend l'ensemble des nœuds du réseau de voiries préalablement chargé par osm2pgRouting. La première couche rassemble l'ensemble du réseau de routes et chemins dont les catégories ont été conservées grâce au fichier « mapconfig.xml », présenté en annexe 2. Ce réseau est segmenté de façon à calculer, pour chaque tronçon, la distance entre chaque nœud, en tenant compte au mieux des caractéristiques qui composent chacun de ses tronçons (voie à sens unique, vitesse maximale autorisée, ...). La vitesse maximale autorisée, attribuée à chaque segment de voirie, a été fixée à partir des limitations de vitesse en vigueur dans le code de la route belge, et plus précisément pour la Wallonie. Ainsi, les autoroutes et autres voies publiques divisées en 4 bandes se sont vu attribuer une vitesse maximale de 120 km/h, les voiries classées comme « residential » par OpenStreetMap se sont vu attribuer une vitesse maximale de

50 km/h, car il s'agit de routes en agglomération, et le reste des voies publiques ont été caractérisées par une vitesse maximale de 90 km/h (Code de la route.be, 2021b).

2.8.3. PostgreSQL

Par la suite, le programme PostgreSQL a été utilisé avec les extensions PostGIS et pgRouting, indispensables à la construction du système de guidage.

L'extension PostGIS permet la prise en charge des données géographiques et permet d'exécuter des requêtes en langage SQL.

PgRouting est une extension du système de gestion de base de données PostgreSQL. Elle permet l'analyse d'un réseau routier et la mise en place d'un outil de routage, à partir de ses différentes fonctionnalités. PgRouting fait partie des projets lancés par OSGeo.

Le programme PostgreSQL est ici utilisé afin de traiter les requêtes faites dans le langage SQL.

2.8.4. PgRouting

Tel que mentionné ci-dessus, pgRouting est un projet qui a pour but de créer, sur base d'un réseau routier, un outil de guidage. Pour ce faire, cette extension reprend plusieurs algorithmes. Les deux principaux sont « pgr_aStar » et « pgr_Dijkstra ».

Plus précisément, l'algorithme aStar ou encore écrit a* est un algorithme de recherche d'itinéraires qui nécessite un point de départ et un point d'arrivée. Il fonctionne de manière heuristique⁵ en choisissant, pour chaque nœud, le chemin le plus court. Cet algorithme fournit donc des itinéraires où les distances entre chaque nœud sont les plus courtes.

Le second algorithme, nommé « Dijkstra », est un « algorithme de recherche d'itinéraires qui résout le problème du chemin le plus court pour un itinéraire avec des coûts de chemin non négatifs, produisant le chemin le plus court d'un sommet de départ à un sommet de fin. » (pgRouting.org, 2021). A la différence du premier, qui s'effectue de manière beaucoup plus rapide et simple, l'algorithme de Dijkstra prend en compte tous les itinéraires possibles, à partir du point de départ, et renvoie le résultat final le plus court. La figure ci-dessous, qui provient d'un article de Ur Rehman et al. (2018), illustre, de manière simple, le fonctionnement de l'algorithme.

⁵ Méthode de résolution utilisée pour fournir une solution réalisable dans une situation complexe. (Deluzarche, 2021)

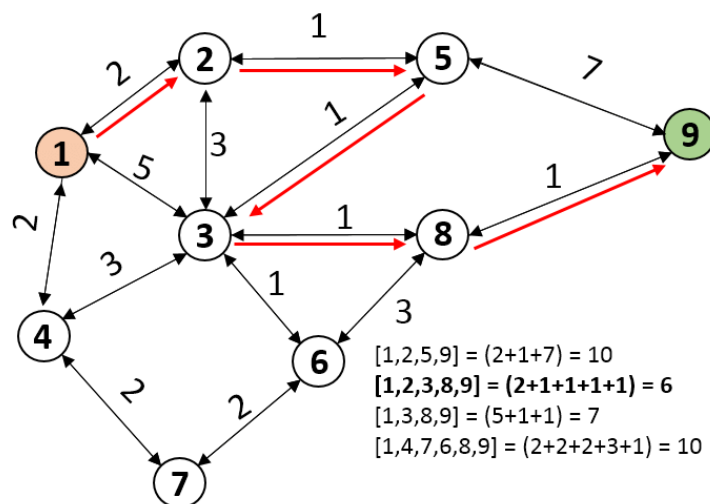


Figure 20. Fonctionnement de l'algorithme de Dijkstra. (Source : Ur Rehman et al., 2018)

L'élaboration de l'outil de guidage présenté dans ce travail s'est faite sur base de l'algorithme Dijkstra. Bien que le temps de calcul de cet algorithme soit supérieur à l'algorithme aStar, il fournit des résultats beaucoup plus probants en termes de navigation routière. En effet, les résultats ont d'abord été visualisés sur le logiciel QGIS grâce à l'extension « pgRoutingLayer ». Celle-ci permet de visualiser les itinéraires entre les points sélectionnés, en fonction de l'algorithme choisi.

Enfin, dans le but de créer une application de routage pratique et utilisable par chacun, une nouvelle fonction a été insérée dans PostgreSQL afin de relier un point à une coordonnée géographique. Ainsi, pour chaque point déterminé sur la carte, correspond un nœud dont les coordonnées spatiales sont connues. Cette fonction permettra par la suite de déterminer, de manière classique, un point de départ et un point d'arrivée.

2.8.5. Geoserver

« GeoServer est un serveur Java qui permet aux utilisateurs d'afficher et de modifier des données géospatiales. » (geoserver.org, 2021)

Geoserver est ici utilisé dans le but de fournir le résultat sous la forme d'une couche WMS pour l'utiliser, par la suite, dans l'élaboration d'une page web. Les différentes couches ainsi que la fonction préalablement créée sur le programme PostgreSQL ont été chargées sur Geoserver.

Lors du chargement des données, il faut tenir compte de l'identifiant de référence spatiale (SRID) propre à chaque couche. En effet, pgRouting travaille uniquement sous l'identifiant EPSG:4326 tandis que OSM utilise l'identifiant EPSG:3857. Les données chargées sur Geoserver se sont donc vu attribuer un SRID EPSG:3857 pour correspondre au fond de carte OpenStreetMap utilisé par la suite.

2.8.6. OpenLayers

OpenLayers est un logiciel libre d'accès qui reprend une bibliothèque de fonctions JavaScript facilitant la mise en place d'une carte dynamique.

Ainsi, à partir d'un canevas de cartes interactives et des éléments contenus sur Geoserver, une page sous format .html a été créée pour réaliser un outil de guidage simple. Le script de la page .html est repris en annexe 1.

3. Résultats

3.1. Précision géométrique des données OpenStreetMap

Lors de l'analyse, 36 points ont été enlevés par souci de précision car la couche d'ombrage ne présentait pas un relief suffisamment visible pour pouvoir être interprété, même lorsque cette couche était davantage retravaillée. Il s'agissait pour la plupart de points situés sur les chemins classés « chemin de grade 4 » ou « chemin de grade 5 », qui peuvent parfois se confondre avec leur milieu lorsqu'ils sont très peu entretenus et fréquentés.

Au final, la moyenne des distances entre les points de la couche OSM et de la couche hillshade est de 2,97 mètres avec un écart-type de 2,32 mètres. Les 214 points étudiés traduisent donc une bonne précision des données OSM. En effet, parmi tous ces points, 147 présentent une erreur considérée comme nulle. 22 points étaient positionnés à des distances comprises entre 1 et 2 mètres. Les points compris dans cette gamme de distances étaient en général placés de manière non centrée sur la voirie, ou sur ses accotements. 32 points étaient placés à des distances comprises entre 2 et 4 mètres. Le reste des points étaient situés à des distances variant entre 4 et 10,96 m pour le maximum. Ce dernier point, le plus distant, est situé à une intersection. L'étude menée à Paris par Brovelli et al. (2016) montre également la grande précision du positionnement des données OSM. En comparant les données OSM avec celles de l'IGN, ils avaient remarqué une variabilité locale, qui produisait des déviations maximales allant de 2 à un peu plus de 10 m.

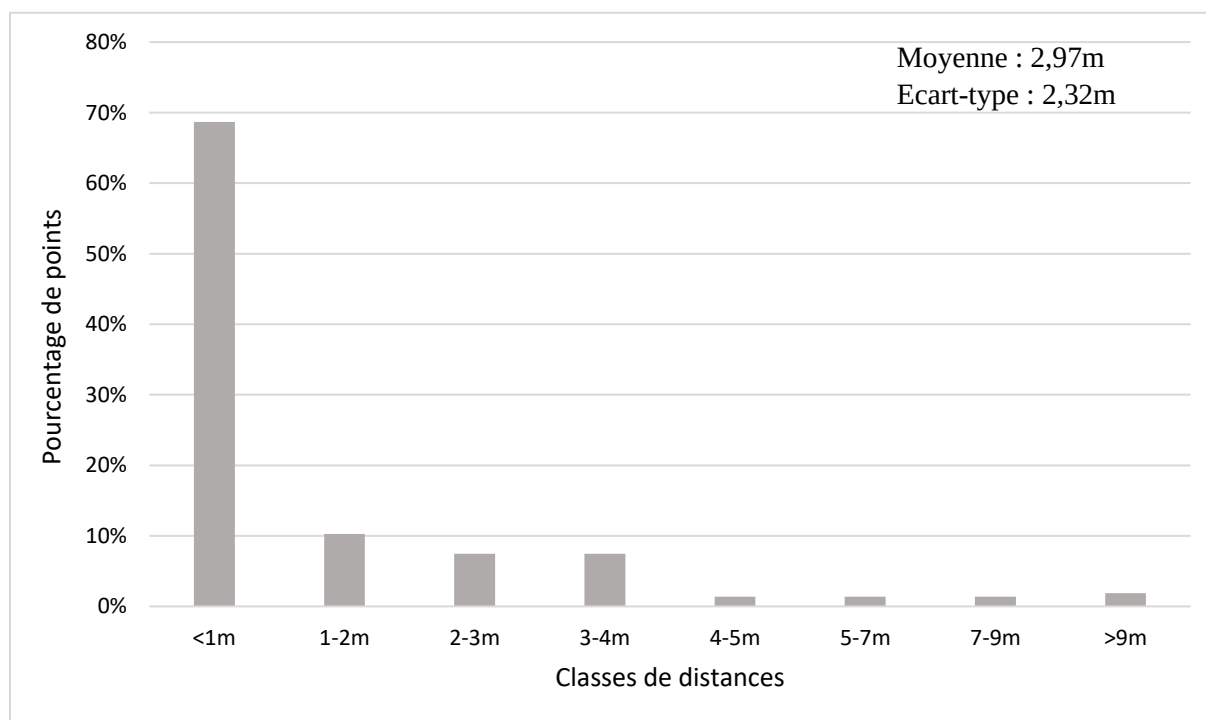


Figure 21. Répartition des points en fonction des classes de distances, dans la mesure de la précision géométrique des données OSM

Nous pouvons donc considérer les données issues de OSM comme précises pour une utilisation sur des systèmes de navigation classiques.

3.2.Exhaustivité et typologie des données OSM

Au cours de ce travail, 75 kilomètres de chemins ont été parcourus afin de vérifier la typologie et l'exhaustivité des données.

Au niveau de l'exhaustivité des données OSM, seuls 2 300 mètres de chemins ont été ajoutés lors de cette étude, soit seulement 3% supplémentaires par rapport aux chemins empruntés. Ce résultat va également dans le sens de l'étude menée par Brovelli et al. (2016) dans la ville de Paris, où la base OpenStreetMap reprenait 438 km de routes en plus que celle de l'IGN, soit 16% en plus. Il est à noter que plus de la moitié des voiries rajoutées lors de ce travail sont caractérisés comme « chemin de grade 4 », donc des chemins de moindre importance. Aucune voie de grande importance, fréquentable par un large cortège de véhicules n'a été ajoutée. On peut donc dire que les données fournies par OSM sont complètes pour l'usage qui nous intéresse.

Ensuite, en ce qui concerne la typologie des chemins proposée par OSM, il convient de constater qu'environ 20% de ceux-ci ne sont pas caractérisés. Il s'avère que ces chemins classés sans « grade », se situent en majorité sur des propriétés privées où des panneaux indiquent une interdiction de passage. C'est notamment le cas au sein d'une propriété privée de 800 hectares qui fait partie du groupement forestier du « Bois des Moines ». L'entrée principale, qui donne sur la N4, et accessible à tous types de véhicules, est entravée par une barrière ornée d'un panneau « entrée interdite » (voir figure 22). Ce type de voirie n'étant pas accessible au grand public, il est logique que le type de revêtement ne soit pas répertorié. Néanmoins, sur base d'images satellites et au vu de la taille et de l'objectif productif de la propriété, il est très probable que le réseau de chemins forestiers y est bien développé.



Figure 22. Entrée d'une propriété privée avec barrière et panneau interdit

Le deuxième constat est que la sémantique liée aux types de chemins, fournie par OpenStreetMap, est bonne. En effet, pour 83% des chemins pour lesquels une information est fournie, celle-ci s'avère correcte. Le classement pouvant être sujet à l'interprétation des utilisateurs, on remarque que c'est la classe intermédiaire « chemin de grade 3 » qui présente le plus d'erreurs. En effet, le critère de classification principal étant l'empierrement de la chaussée, le statut est sensible à des variations suite à d'éventuels travaux de refaction, ou à l'inverse, suite à une fréquentation excessive ou des précipitations qui peuvent altérer la qualité du chemin. L'année 2021, exceptionnelle en termes de volumes de précipitations a permis de se rendre compte de l'état très variable des chemins empierrés. De fait, certains chemins, au départ en bon état, qui présentent une certaine pente, se sont vu traverser par des eaux de ruissellement qui ont emporté la couche supérieure de graviers et dans certains cas, ont même creusé des sillons dans les chemins (voir figure 23), les rendant difficilement praticables voire impraticables. Ce constat ressort également d'un échange avec deux agents de triage du cantonnement de Nassogne, qui m'alertaient de l'état de certains chemins, auparavant fortement fréquentés, qui sont devenus infranchissables même avec un véhicule 4x4.



Figure 23. Sillon creusé par l'eau sur un chemin en pente

En analysant davantage les chiffres liés aux chemins possédant une typologie erronée, on se rend compte que le grade des chemins doit être surclassé dans 60% des cas. Également, parmi les chemins mal répertoriés, seuls 7% présentaient une erreur de classement importante. Cette erreur émane principalement d'une petite zone surclassée du grade de sentier à celui de « chemin de grade 3 ».

Au vu de ces résultats et de l'amélioration constante des données OSM, nous pouvons considérer que celles-ci constituent une bonne base pour un travail futur et des manipulations de données.

3.3. Adéquation chemins – véhicules

Avant d'aller plus loin, il est à noter que la portion de voiries échantillonnée a permis de déterminer les types de véhicules qui peuvent être associés à chaque type de chemin. Le travail montre, ci-dessus, que les données OSM sont assez précises au niveau de leur typologie. Ceci implique que nous pouvons considérer les chemins classés au grade 2 comme empierrés et donc potentiellement utilisables par toute une gamme de véhicules.

Cependant, le revêtement et l'état de la route ne sont pas les seuls facteurs à prendre en compte. Dès lors, de façon supplémentaire à la vérification de la sémantique des données OSM, la largeur de la chaussée ainsi que son état ont également été relevés pour tous les chemins parcourus.

Largeur de la chaussée (m)	2	2,5	3	3,5	4	moyenne (m)
chemin grade 2	0	0	17	4	5	3,27
chemin grade 3	2	14	13	1	0	2,72
chemin grade 4	13	14	4	1	1	2,44
chemin grade 5	4	4	2	0	0	2,40

Figure 24. Nombre de segments de chemins classés en fonction de la largeur de la chaussée (m) et du type de chemin

Suite à ce relevé, on observe que les chemins classés comme « grade 2 » sont associés à une largeur minimale de 3 mètres, soit la largeur minimale préconisée par les auteurs de Forêt Pro Bos. On remarque également que les largeurs de chemins, quels qu'ils soient, ne dépassent pas 4 mètres, soit 2 mètres de moins que la largeur recommandée par Forêt Pro Bos. Les grumiers se retrouvent donc sur des chemins ou des routes forestières sur lesquels la marche de manœuvre est faible, en témoigne la photo ci-dessous (figure 25).



Figure 25. Grumier empruntant une route forestière sur la commune de Nassogne

En parallèle, on peut observer que l'état des chemins parcourus est globalement bon. Cependant, on observe tout de même que l'état des voiries est impacté par son revêtement. En effet, la couche de pierres disposée sur les chemins de grade 2 joue un rôle important sur l'état de la voirie. Son avantage principal est qu'elle permet l'infiltration de l'eau dans le sol tout en gardant son pouvoir porteur. A l'inverse, les voiries non empierrées sont beaucoup plus impactées par les dégâts d'orniérages. Ceci est dû à la diminution importante de la portance du sol lorsque les conditions sont humides (Centre de recherches routières, 2014). Par conséquent, on peut considérer que les voiries empierrées, lorsqu'elles sont bien

entretenues, conservent un bon état général permettant la circulation de véhicules lourds comme les grumiers. Un entretien régulier est néanmoins nécessaire pour garantir un revêtement empierré des voiries, après une forte fréquentation ou après des épisodes pluvieux importants qui altèrent la qualité des chemins.

Dans la suite de ce travail, l'ensemble du réseau routier public ainsi que les chemins de niveau 2 seront considérés comme empruntables par l'ensemble des véhicules.

3.4. La sécurité des accès

Autre élément crucial pour un réseau de dessertes forestières sécurisé, les jonctions entre le réseau routier public et les massifs forestiers ont été catégorisées. Cependant, de la même manière que pour les voiries en elles-mêmes, ces accès sont souvent sous-dimensionnés.

Or, bien que la largeur des accès ne réponde pas aux caractéristiques optimales recommandées, les chemins n'en restent pas inatteignables. En effet, le schéma fourni en figure 5 reprend un chemin forestier perpendiculaire à la route. Cette configuration ne se présente pas fréquemment dans le cas de la commune de Nassogne. Dès lors, dans de nombreux cas, bien que certaines largeurs d'accès semblent trop faibles, les chemins restent tout à fait accessibles aux grumiers sans pour autant entraver la circulation ou nécessiter des manœuvres périlleuses.

Une seconde caractéristique propre aux accès qui a été étudiée est la visibilité. Celle-ci a été jugée suffisante lorsque la vue, en sortie de massif, est suffisamment dégagée et permet d'anticiper l'arrivée d'un éventuel véhicule (Pro Bos, 2020b). Dans le cas où la vue est entravée par de la végétation, des panneaux de circulation ou lorsque la configuration de la route (ex : route sinueuse) ne permet pas d'anticiper le passage d'un autre véhicule, la visibilité a été classée comme insuffisante. Au total, 117 accès présentent une visibilité satisfaisante tandis que les 53 autres présentent des lacunes. La carte ci-dessous (figure 26) répertorie tous les accès relevés et leur visibilité. Également d'un point de vue sécuritaire, la présence d'une barrière placée à une distance trop faible (<25 m) par rapport à la jonction entre le réseau routier public et la desserte forestière peut engendrer un blocage temporaire de la circulation et donc une baisse de la sécurité. Seules 3 barrières placées à une distance inférieure à celle recommandée par Pro Bos (2020b) ont été répertoriées sur l'ensemble de la commune, au niveau des voiries accessibles aux grumiers.

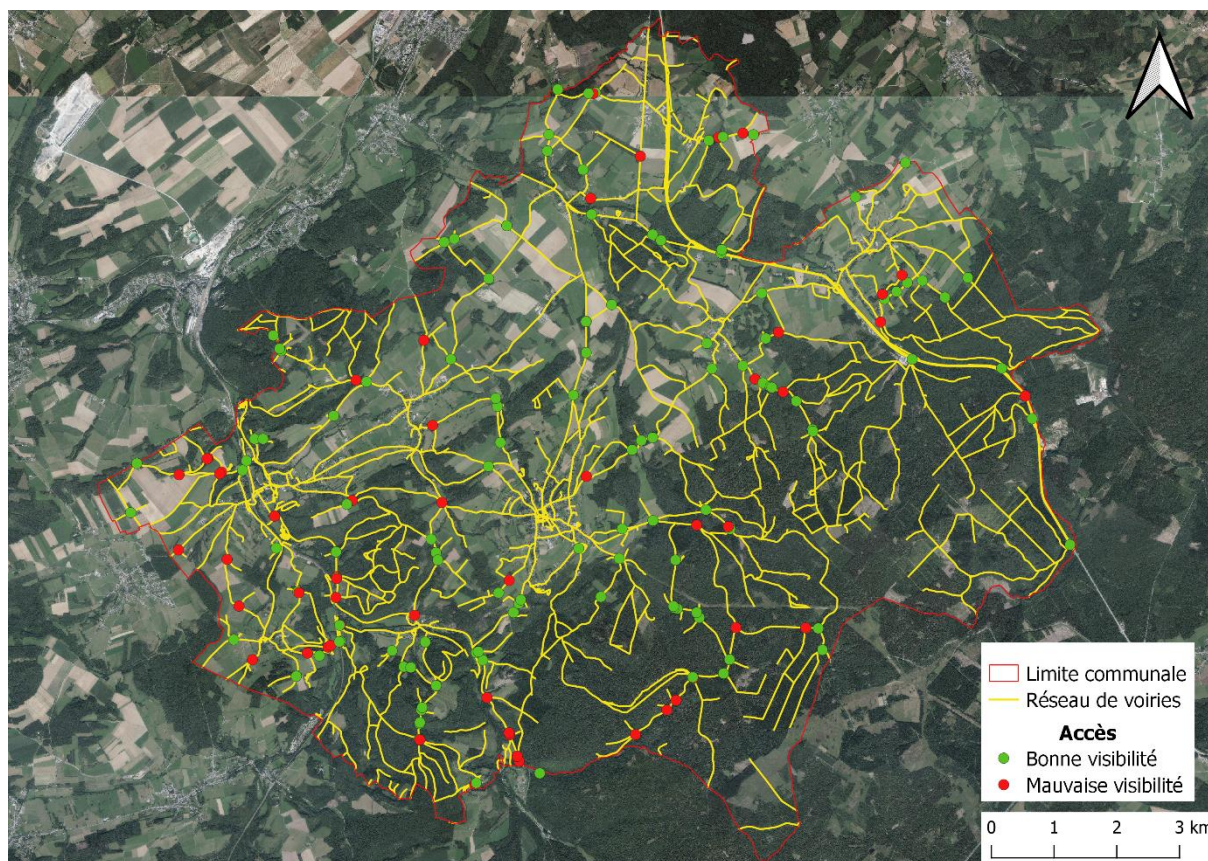


Figure 26. Localisation des accès dans la commune de Nassogne, classés en fonction de la visibilité

3.5. Localisation des chemins pouvant accueillir les grumiers

Tel qu'il a été mentionné dans le paragraphe 3.3, les voiries considérées comme capables d'accueillir toutes sortes de véhicules sont toutes les routes du réseau routier public ainsi que les chemins classés « chemin de grade 2 », les « chemins de grade 1 » étant considérés comme routes puisqu'ils présentent un revêtement hydrocarboné.

La distance de débardage, soit la distance entre une propriété forestière et une voirie forestière accessible aux grumiers, doit être de maximum 500 mètres, avec une distance optimale de 200 mètres (CRPF Nord - Pas de Calais Picardie, 2005). Pour ce faire, un classement des distances a été effectué autour des voiries accessibles aux grumiers (figure 27). Grâce à cette carte, on constate que les propriétés forestières de la commune de Nassogne sont globalement bien desservies par les voiries forestières.

Sur la figure 27, on distingue cependant deux grandes zones déficitaires en voiries accessibles aux grumiers. La zone 1 reprend essentiellement une grande propriété forestière privée (groupement forestier du Bois des Moines) dont les voiries sont inaccessibles au public. Au sein de cette propriété, on peut néanmoins distinguer, sur base d'orthophotos, un réseau de voiries forestières assez bien développé. Dès lors, à cause du caractère privé de cette zone, on ne peut pas vraiment tirer une conclusion sur un manque potentiel de voiries puisqu'il est en partie issu du manque de précision sur le caractère des chemins.

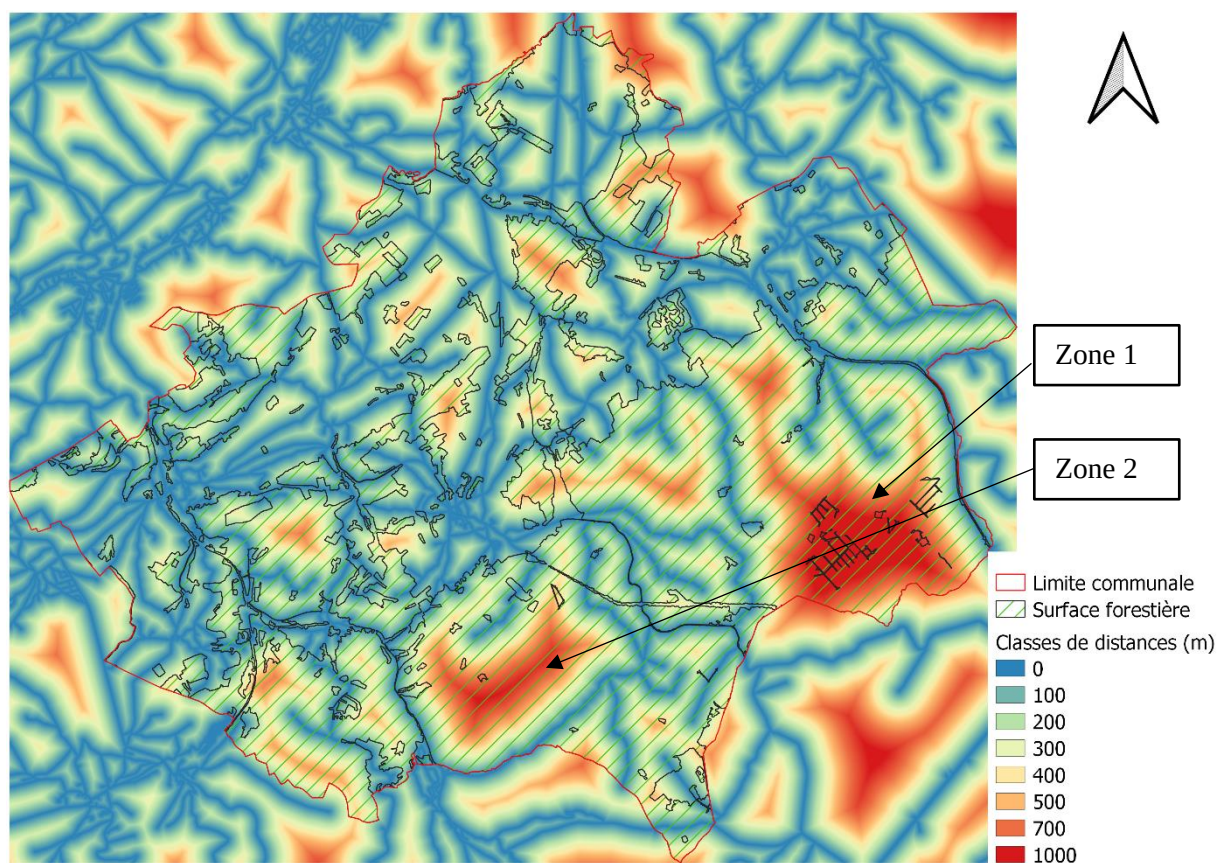


Figure 27. Classement des distances par rapport aux voiries accessibles aux grumiers

Au contraire, la majeure partie de la zone 2 reprend des forêts appartenant à la commune. En faisant un zoom sur cette zone, on constate qu'il existe déjà plusieurs voiries. Celles-ci, lorsqu'elles sont classifiées, sont majoritairement classées comme « chemin de grade 3 ». Elles sont donc considérées comme non praticables par les grumiers. Il serait donc légitime de réfléchir à de potentiels travaux d'aménagement afin de limiter la distance de débardage et ainsi désengorger cette partie du massif. Pour illustrer l'état actuel de la desserte dans la zone 2, un zoom a été réalisé sur cette zone (figure 28). Afin de limiter les effets sur le couvert forestier et pour diminuer les coûts d'une telle entreprise, une amélioration des voiries pourrait être faite dans la zone 2. Au total, au niveau de la zone 2, une amélioration des chemins déjà existants devrait être entreprise sur une distance d'environ 8 kilomètres. Ces travaux peuvent aller d'un simple empiérement à un élargissement de la chaussée. Il est donc tout à fait possible, sur base des chemins déjà existants, de réduire les distances de débardage pour une surface forestière non considérable, ici d'environ 200 hectares.

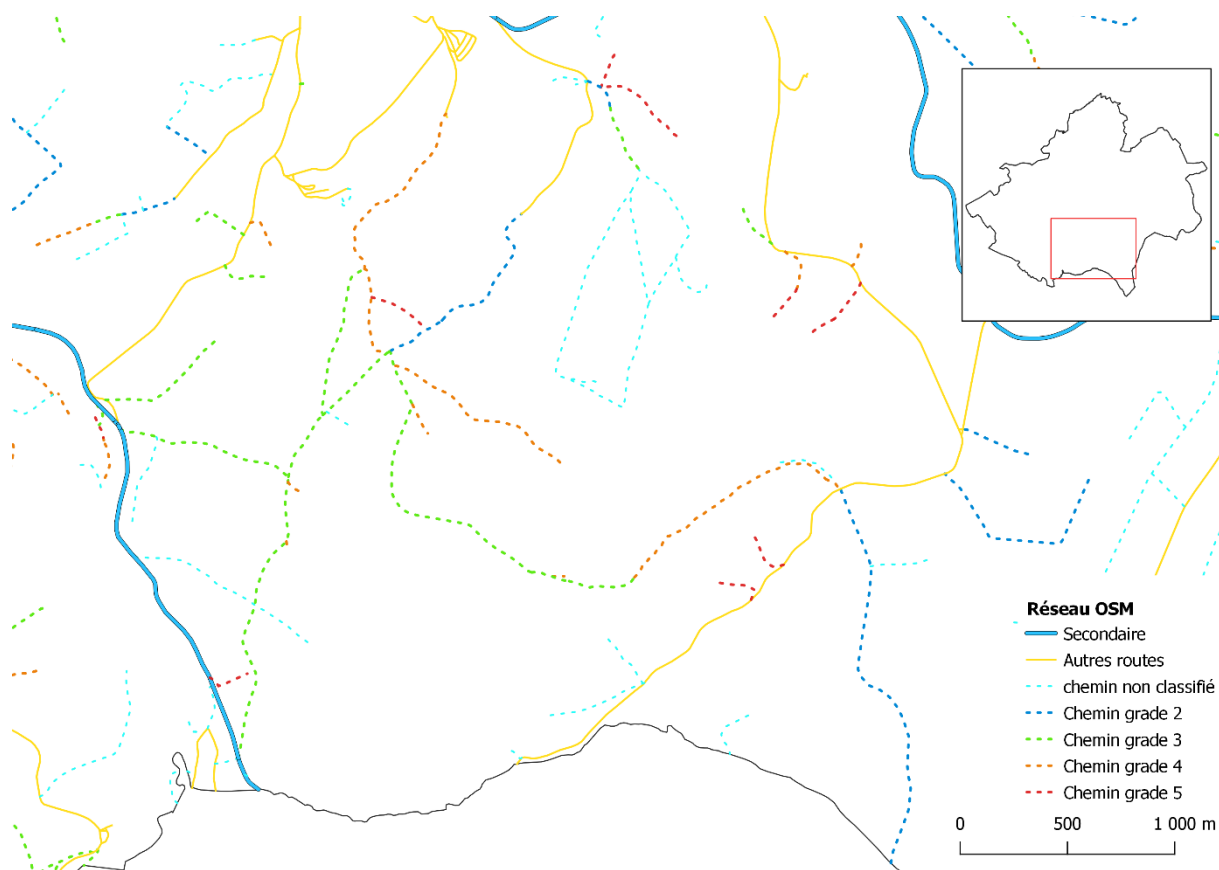


Figure 28. Zoom sur la zone 2 désignée sur la figure 27

3.6. Localisation des quais de chargement

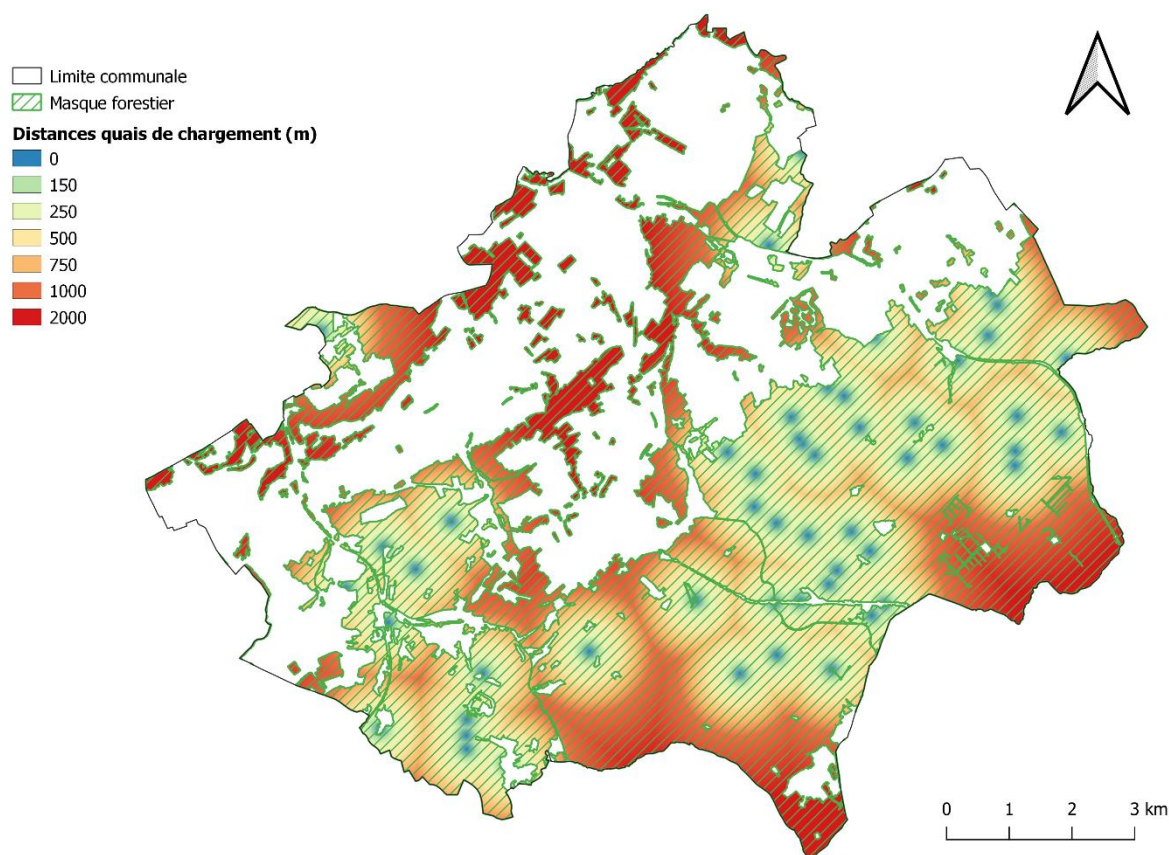


Figure 29. Classement des distances (m) par rapport aux quais de chargement

A partir de la figure 29, on remarque que la zone sud-ouest faisant partie des forêts publiques de la commune de Nassogne comprend des lacunes au niveau du nombre de quais de chargement, de façon assez similaire aux voiries accessibles aux grumiers.

De plus, on note une insuffisance de quais de chargement au sein des forêts privées, dont les peuplements sont beaucoup plus dispersés sur l'étendue de la commune. En effet, les données qui ont permis la cartographie de ces éléments de desserte émanent des données du DNF et des agents de triage de la commune. Ceci explique le manque d'informations au niveau des propriétés privées. Il est dès lors difficile de tirer des conclusions concernant ces lieux.

Sur l'ensemble du territoire communal, seuls 52 quais de chargement ont été répertoriés. Si on considère uniquement la surface forestière publique, on se rend compte qu'il faudrait environ 3 fois plus de quais pour se situer dans la fourchette optimale proposée dans le projet Forêt Pro Bos. Dès lors, de façon complémentaire à ces quais, les exploitants utilisent également des zones dégagées en bordure de chemin pour stocker leurs grumes. A l'inverse des quais de chargement qui sont des espaces dégagés visant à accueillir les grumiers sans perturber la circulation au sein du massif, les zones de stockage en bord de voirie obligent les camions à entraver le chemin lors du chargement. De plus, ces bois qui sont stockés sur les accotements pourraient, à termes, altérer la qualité de l'infrastructure. Il est également à noter que, d'après les agents de triage, les bois résineux sont stockés à très court terme, à l'inverse des grumes feuillues dont le volume exact doit être recalculé de manière précise. Celles-ci sont donc stockées, en bordure de route, sur des durées beaucoup plus longues. Un exemple d'aire de stockage est illustré sur la photo suivante.



Figure 30. Aire de stockage en bordure de voirie

3.7. Structure et volume de la forêt résineuse

Sur l'ensemble de la commune, les hauteurs dominantes se présentent telles qu'illustrées sur la figure 31. Cette répartition des hauteurs dominantes semble en adéquation avec les chiffres repris dans le plan d'aménagement de la commune (Service public de Wallonie, 2013). De fait, on observe que la majorité des peuplements d'épicéa sur la commune de Nassogne sont âgés d'une trentaine à une quarantaine d'années. Selon Perin et al. (2014), plus de 85% des peuplements résineux en Wallonie font partie des classes de productivité comprises entre 1 et 3. En considérant que la commune de Nassogne intègre ces 85%, on remarque que les hauteurs dominantes estimées rejoignent les courbes de productivité données pour l'épicéa. La hauteur moyenne estimée pour l'ensemble des polygones considérés est de 22,02 m, avec un écart-type calculé de 7,30 m.

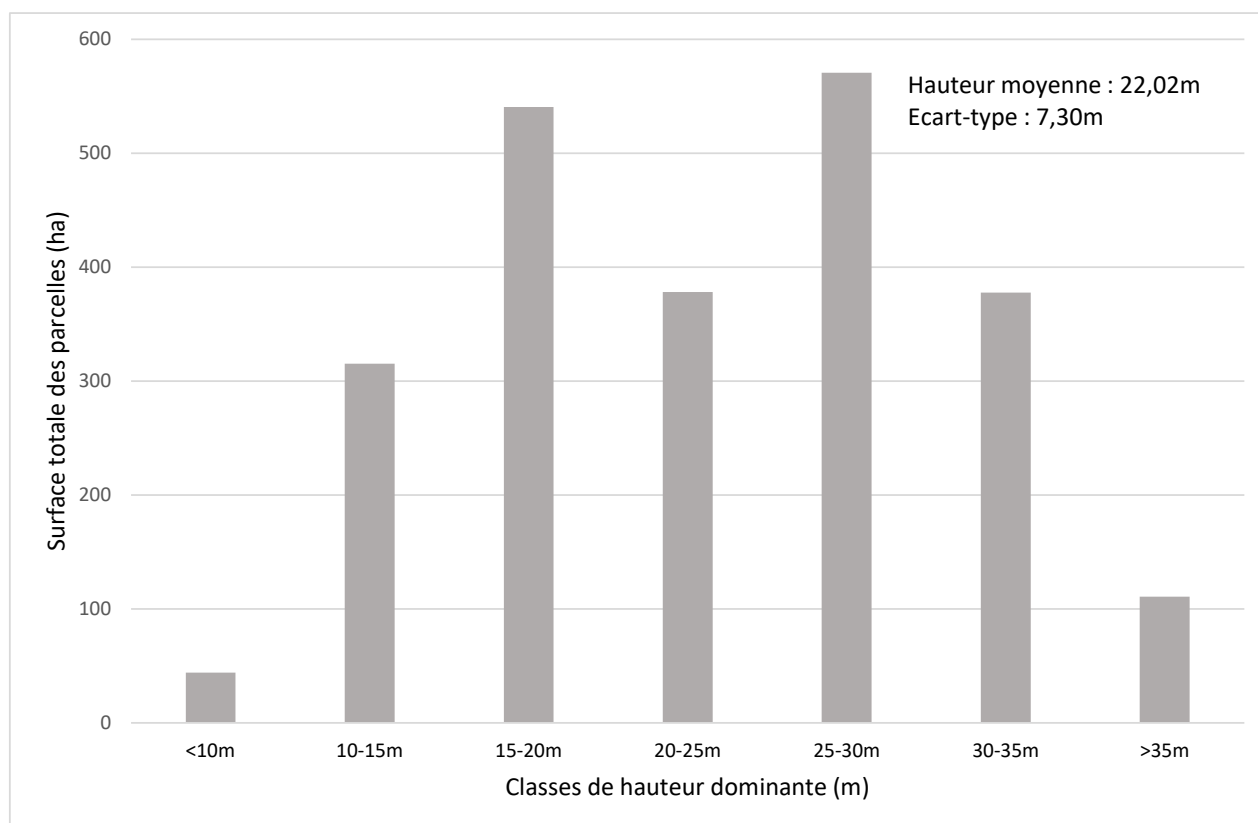


Figure 31. Répartition des hauteurs dominantes par classe, sur la commune de Nassogne

A partir de ces hauteurs dominantes, le VHA a pu être estimé. A partir des deux formules d'estimation du volume à l'échelle d'un peuplement, on remarque que la première formule, donnée par Rondeux (1977) surestime les volumes, par rapport à la seconde formule donnée par Dagnelie et al. (2013), lorsque les hauteurs dominantes sont faibles. A l'inverse, lorsque les hauteurs dominantes sont plus élevées, c'est la seconde formule qui donne les volumes à l'hectare les plus élevés. Pour la hauteur dominante la plus élevée, soit 41,2 m, la seconde formule donne des volumes à l'hectare supérieurs d'environ 55 m³, soit un peu moins de 10% du VHA calculé. Ainsi, pour l'ensemble des peuplements résineux de la commune de Nassogne, on obtient un volume de bois sur pied de 806 371 m³, à partir de la première formule, et un volume de 852 036 m³ à partir de la seconde formule.

Le tableau ci-dessous exprime le volume à l'hectare moyen pour l'ensemble des peuplements résineux de la commune de Nassogne.

Tableau 3. Estimation du VHA moyen, en forêt résineuse, sur la commune de Nassogne

	Surface forestière (ha)	Surface forestière résineuse (ha)	VHA moyen (m ³)
Formule 1	6575,00	2432,75	331,46
Formule 2			350,24

Ce volume à l'hectare moyen traduit donc un volume de bois à mobiliser considérable dans le futur et donc une nécessité de faire valoir, auprès des gestionnaires forestiers, l'importance de développer et de maintenir en état la desserte forestière de la commune. Un répertoire complet, sur l'ensemble des

territoires forestiers de la commune, permettrait notamment de mettre en avant les zones déficitaires en aménagements forestiers.

3.8. Outil de guidage interactif

L'outil de guidage réalisé dans le cadre de ce travail se présente sous la forme d'une page web classique. Celle-ci est composée d'un fond de carte OpenStreetMap, d'une légende et d'un bouton « effacer » permettant de remettre à zéro l'itinéraire. La figure 32 ci-dessous illustre la vue globale de la page.

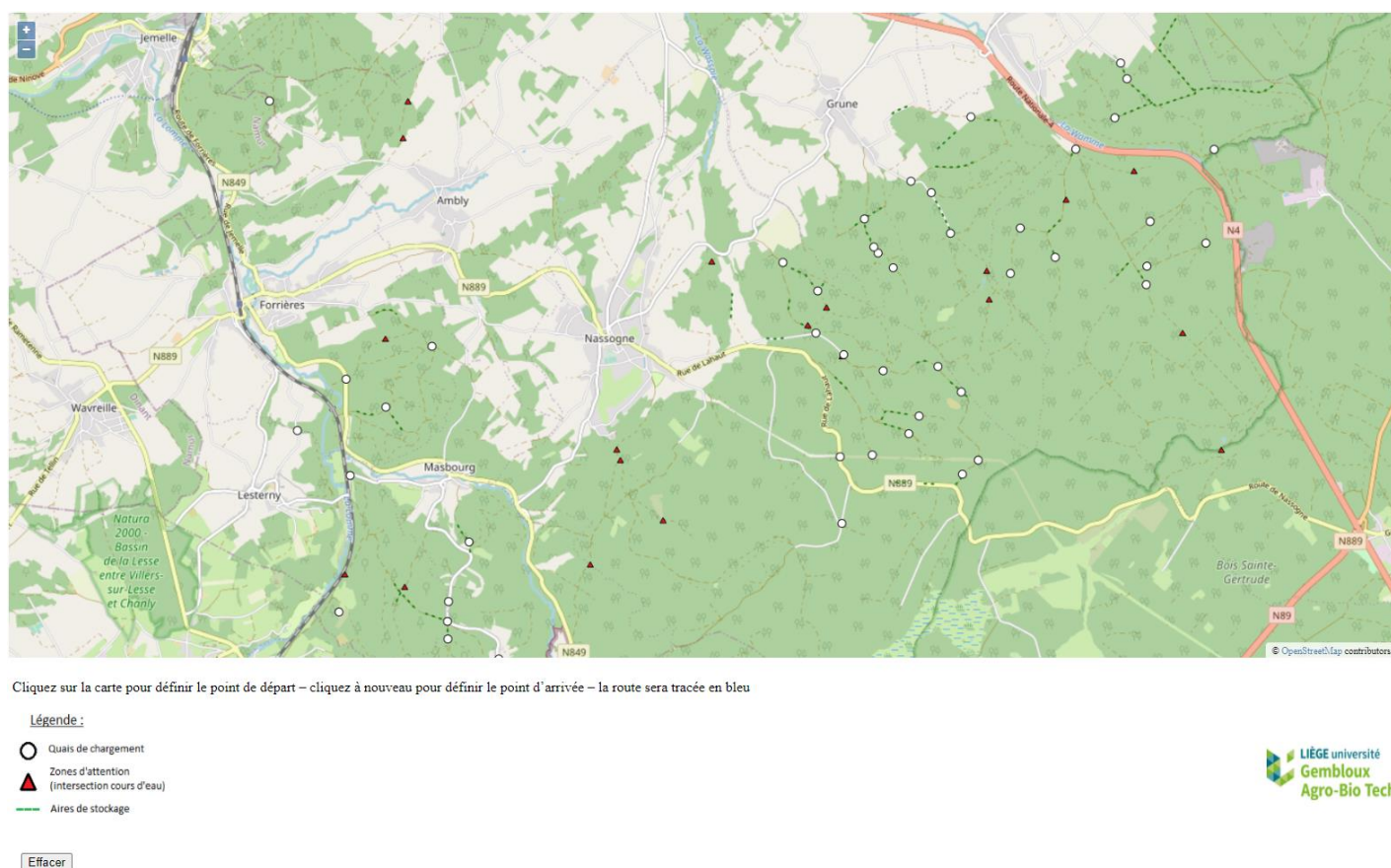


Figure 32. Illustration de la page web

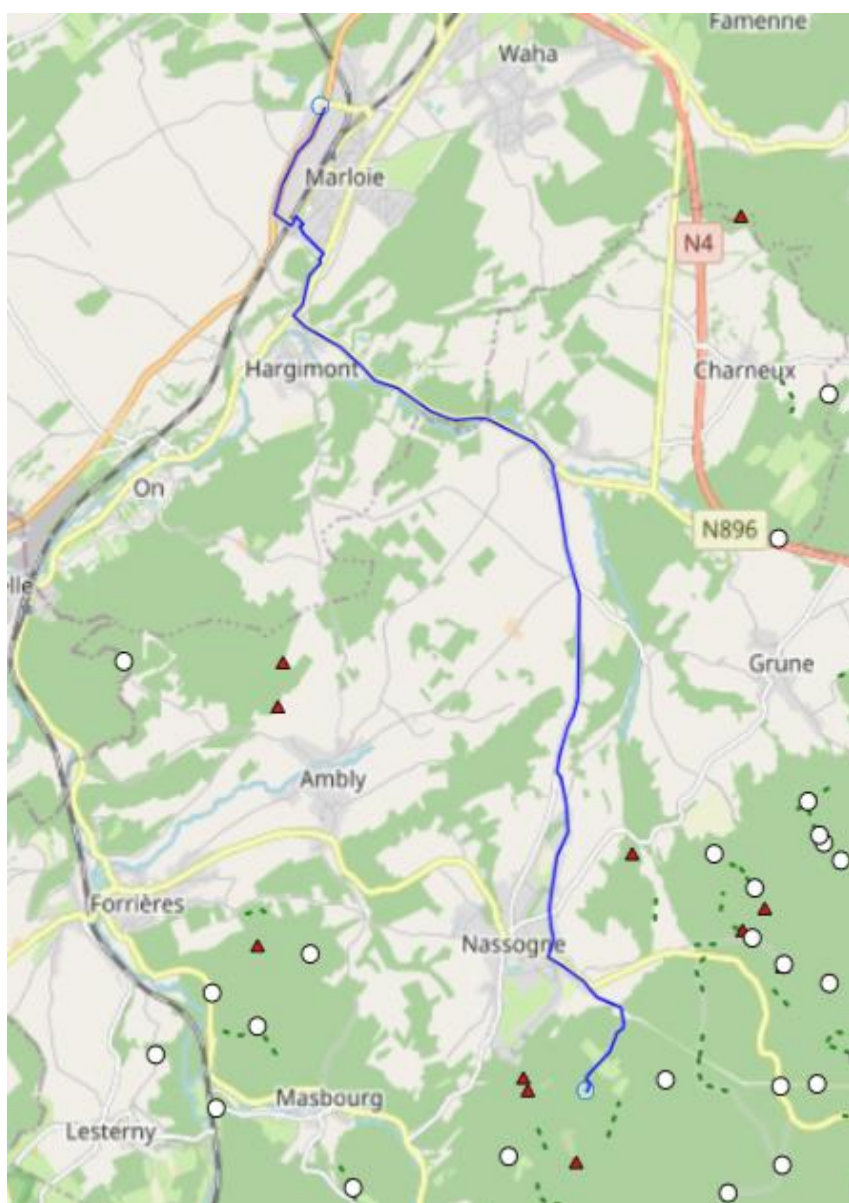
Le fond de carte comporte trois autres éléments. Les quais de chargement, les aires de stockage et les intersections des chemins avec les cours d'eau ont été indiqués. A noter que ces points d'attention ne se situent pas sur des chemins empruntables par des grumiers.

Globalement, l'outil créé dans le cadre de ce travail fournit des itinéraires précis et optimaux. En effet, à titre de comparaison au niveau du réseau routier public, le système a été testé par rapport à d'autres applications bien connues telles que Google Maps ou Mappy. Par rapport à ces systèmes, qui ne reprennent que le réseau routier public, les tracés sont semblables dans la majorité des cas. Cependant, on remarque certaines incohérences, notamment lorsque la vitesse attribuée à un segment de route ne correspond pas à la réalité. Dans ces cas-là, le calculateur désigne, logiquement, l'itinéraire le plus court géométriquement.

A l'inverse des applications « classiques », où seules les routes faisant partie du réseau routier public sont mentionnées, l'outil de guidage développé ici présente un réel avantage en reprenant l'ensemble des routes et des chemins de la région concernée. Il serait donc utilisé de façon à simplifier le travail des gestionnaires et des exploitants forestiers en les guidant vers les points importants du réseau. De plus, cette carte pourrait être mise à jour facilement et régulièrement par les gestionnaires.

3.9. Test de l'outil de guidage

Pour présenter plus en détails l'outil réalisé dans le cadre de ce travail, plusieurs scénarios ont été imaginés dans le but d'illustrer les itinéraires calculés par l'application. Pour chaque scénario, illustré ci-dessous, une analyse du tracé est faite en parallèle. Les itinéraires sont représentés par le tracé bleu.



Cas n°1 :

Ce premier tracé représente un itinéraire imaginé entre la scierie Fruytier, qui se situe dans le zoning industriel de Marloie, et une parcelle résineuse sélectionnée aléatoirement dans la commune de Nassogne. Sur ce premier cas de figure, on remarque que l'outil fournit un itinéraire idéal entre ces deux points. Il fournit également un itinéraire précis jusqu'au point d'arrivée (rond bleu clair). Ceci traduit le fait que la parcelle résineuse choisie se situe à côté d'un chemin utilisable par les grumiers.

Figure 33. Itinéraire n°1 entre la scierie Fruytier et une parcelle résineuse choisie aléatoirement

Cas n°2 :

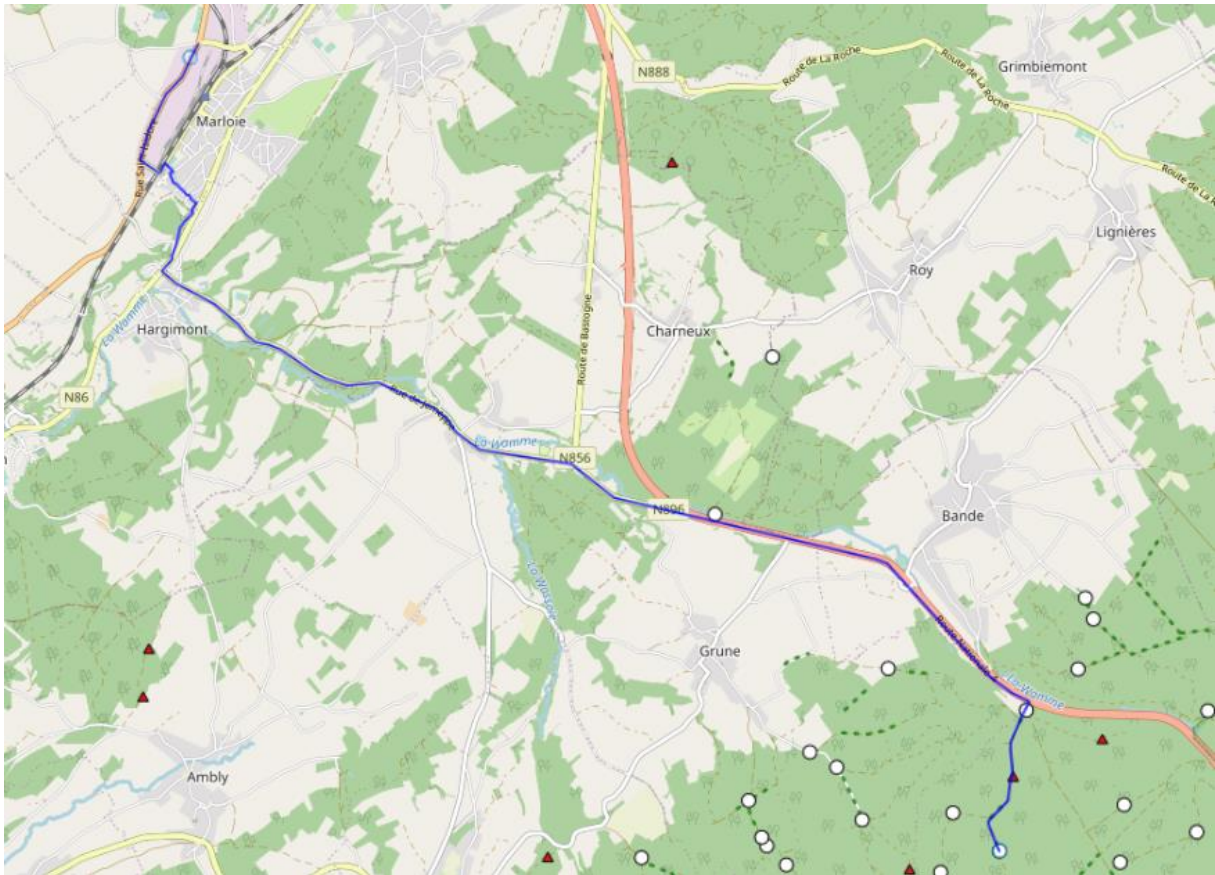


Figure 34. Itinéraire n°2 entre la scierie Fruytier et une parcelle résineuse située à l'est de la commune de Nassogne

Dans ce cas-ci, le tracé est de nouveau réalisé entre la scierie résineuse Fruytier et une parcelle résineuse située à l'est de la commune de Nassogne. De nouveau, l'itinéraire est rapide et adéquat puisqu'il utilise majoritairement de grands axes tels que la N896 et la Nationale 4. Contrairement à Google Maps, le tracé s'arrête au niveau du quai de chargement (rond blanc), désigné comme point d'arrivée. De fait, Google Maps ne considère pas ce chemin dans sa base de données. A l'inverse, le chemin étant empierré, il est classé comme chemin de grade 2 sur OSM. Ces chemins ayant été caractérisés comme utilisables par les grumiers, l'itinéraire établi par l'outil de guidage est donc plus précis au niveau du point d'arrivée.

Cas n°3 :

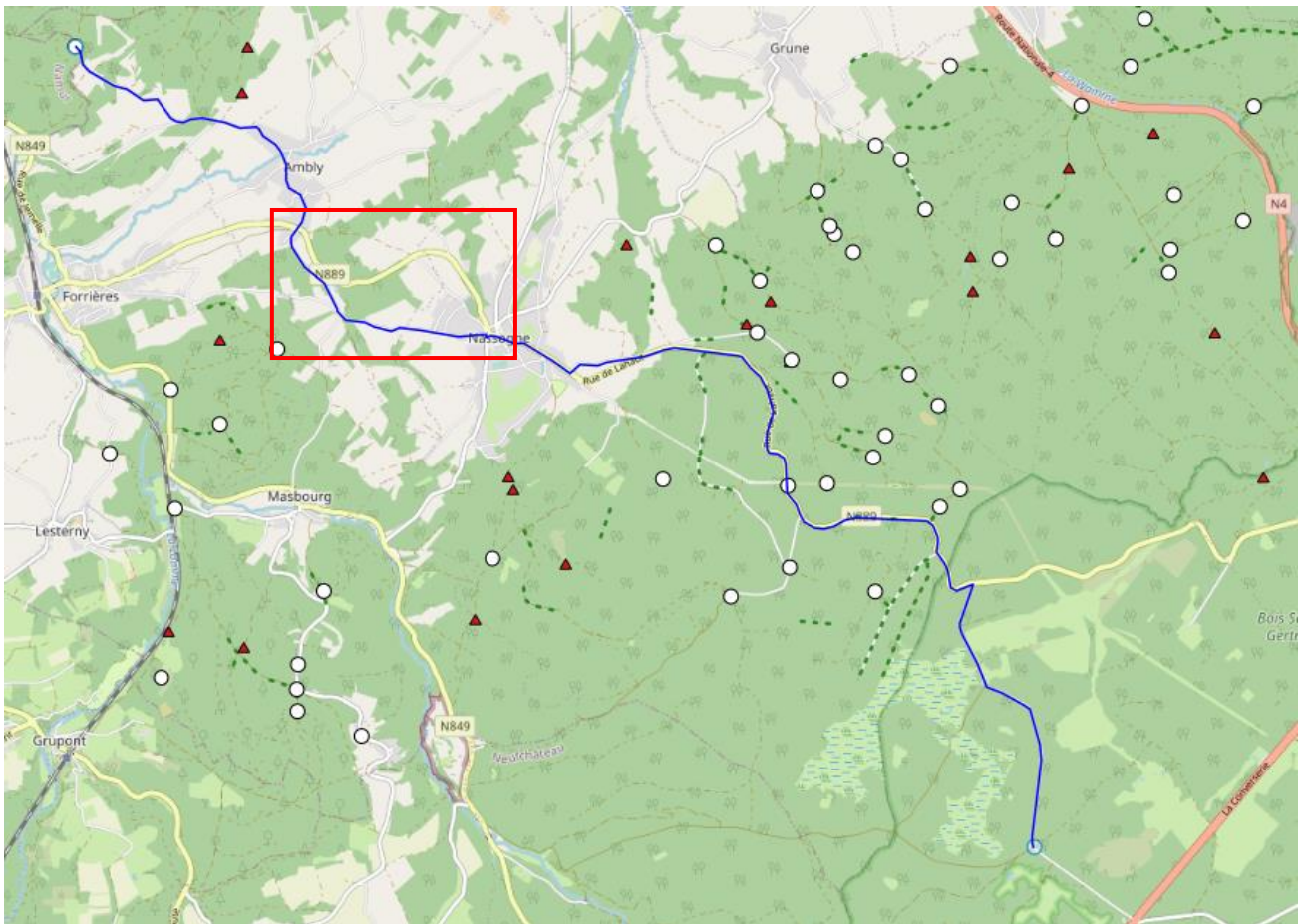


Figure 35. Itinéraire n°3 entre un quai de chargement situé dans le village d'Ambly et le parc à grumes de Mochamps

Ce dernier itinéraire a été imaginé au départ d'un quai de chargement situé dans le village d'Ambly jusqu'au parc à grumes situé à Mochamps, dans la commune voisine de Nassogne. Dans ce cas-ci, on observe un tracé qui comporte une erreur mise en avant par l'encadré rouge. En effet, de façon pratique, on favoriserait un trajet continu sur la N889 qui est une route plus rapide et propice à la circulation de grumiers. Cette erreur émane d'une erreur de classification de 2 segments de route de la part d'OSM. Elle engendre, dès lors, une mauvaise attribution de la vitesse maximale aux segments concernés. Le calculateur fait donc ressortir le trajet le plus court géométriquement.

4. Discussion

Dans cette partie, les résultats seront discutés afin de répondre aux objectifs du travail. La discussion est présentée en trois parties. La première aborde le réseau de dessertes forestières à l'échelle de la commune de Nassogne, la seconde traite l'utilisation des données OpenStreetMap dans le développement du système de guidage destiné à l'exploitation forestière et enfin, la troisième envisage les perspectives pour une utilisation élargie de ce type d'outil.

4.1. Le réseau de dessertes forestières sur la commune de Nassogne

La desserte forestière au sein de la commune de Nassogne, véritable commune forestière, est particulièrement bien développée. En effet, si on reprend les différentes cartes présentées, il est clair que le nombre de voiries qui parcourent la commune est important. Cette étude s'intéressant essentiellement aux chemins accessibles aux grumiers, les chemins de grade 3 ou inférieurs n'ont pas été étudiés en détail.

En s'intéressant à la répartition des chemins de grade 2, ou supérieurs, au sein de la commune de Nassogne, deux grandes zones forestières apparaissent comme non desservies. D'une part, ceci est dû à une classification insuffisante répertoriée sur OpenStreetMap. D'autre part, on s'aperçoit qu'un investissement, à partir des chemins déjà existants, peut considérablement limiter les distances de débardage pour des massifs de plusieurs dizaines d'hectares. Ce genre d'investissement serait donc rapidement amorti grâce à la réduction des coûts liés à l'exploitation de ces parcelles.

Au niveau du dimensionnement des voiries visant à accueillir des grumiers ainsi que des accès, on remarque un sous-dimensionnement de ces éléments par rapport aux dimensions optimales recommandées. Bien que ceci n'impacte pas directement la circulation au sein des massifs forestiers, des chaussées plus larges, ou du moins des surlargeurs prévues à des endroits stratégiques, permettraient d'éviter des situations inextricables et sécuriseraient davantage les usagers de la desserte forestière.

Concernant les quais de chargement, on s'aperçoit qu'ils couvrent la majeure partie des forêts publiques. Cependant, leur nombre pourrait être revu à la hausse afin de se rapprocher des valeurs optimales conseillées et ainsi limiter les places de stockage en bordure de voirie. Hormis une diminution du stockage à des endroits inappropriés et de ses conséquences, cela permettrait également de réduire les blocages durant la durée de chargement des grumiers.

Bien qu'un réseau de dessertes forestières extrêmement bien développé soit positif pour l'exploitation forestière, il faut également tenir compte des contraintes qui y sont associées. En effet, en raison du coût plus élevé à prévoir pour des voiries plus larges, en raison des contraintes physiques imposées par l'environnement mais encore en raison des contraintes liées au paysage. Dans l'optique d'une gestion multifonctionnelle de nos forêts wallonnes, ce dernier point est également à prendre en compte. Dans ce sens, le projet AGRETA a montré que 78% des personnes auditionnées préféraient se déplacer sur des sentiers plutôt que sur des chemins ou des routes. Un excès de voiries larges composées d'éléments solides pourrait, dès lors, directement impacter le caractère naturel recherché des forêts, qui deviendraient moins attractives pour les usagers en quête de dépaysement.

4.2. Utilisation des données OpenStreetMap dans un système de guidage

L'outil de guidage réalisé dans le cadre de ce travail repose sur des données obtenues à partir du projet de cartographie collaboratif et OpenAccess OpenStreetMap. Les résultats ont montré que cette base de données se révèle être un allié précieux dans la mise en place d'un outil de guidage destiné à la circulation en forêt. En effet, la bonne précision géométrique des données OSM lui permet d'être utilisable par des systèmes GPS classiques et l'exhaustivité de ses données offre à l'utilisateur une représentation fidèle du réseau dans lequel il va devoir naviguer.

Bien qu'il existe certaines lacunes dans la base de données OpenStreetMap, celle-ci présente de nombreux avantages, tels que son accessibilité et son édition par les utilisateurs de la voirie forestière. Une première source d'amélioration de la base de données pourrait donc émaner d'une plus grande participation des usagers, ce qui permettrait de développer davantage le réseau et de classer plus précisément les chemins.

Également dans l'optique de développer la base de données et d'en améliorer la qualité de classification, plusieurs études se sont penchées sur l'utilisation de l'intelligence artificielle et plus précisément de l'apprentissage automatique, dit « machine learning » en anglais (Vargas et al., 2020). C'est notamment le cas d'une étude réalisée en Norvège par Salberg et al. (2017) qui utilisent le principe du « réseau neuronal convolutif profond », pour identifier, sur base de données LiDAR, des voiries forestières. Les résultats de cette étude sont très encourageants puisqu'ils ont été capables, à partir du fichier d'entraînement, de cartographier les routes forestières avec une précision globale de 97,2%.

Une autre étude propose également une autre piste d'amélioration en utilisant, cette fois, des séquences de positions GPS émanant des utilisateurs afin d'enrichir la base de données et de corriger ses erreurs (Basiri et al., 2016).

Ainsi, le nombre croissant de contributeurs à la base de données OpenStreetMap, l'avènement de nouvelles technologies ou encore l'amélioration des images satellitaires sont autant de sources pour compléter et améliorer les données OSM.

4.3. Perspectives

4.3.1. Le guidage en forêt wallonne

Ce travail lance les bases de l'utilisation de données cartographiques dans l'élaboration d'un outil de guidage dédié au paysage forestier. Bien que l'outil soit programmé à l'échelle d'une commune, il serait tout à fait possible de l'adapter à un territoire plus large tel qu'à l'échelle d'une région ou d'un pays, à l'image de l'outil Naviforest qui couvre l'ensemble du territoire français. De plus, les résultats présentés dans le cadre de ce travail, mais également dans de nombreuses autres études sur l'utilisation des données OSM à la base d'un système de navigation sont prometteurs.

4.3.2. Gestion en direct du réseau de voiries

De manière complémentaire à l'outil de guidage, plusieurs études utilisent pgRouting dans la création d'itinéraires auxquels peuvent venir s'ajouter des obstructions sur base de constatations d'usagers. Ceci viendrait donc s'ajouter à la mise à jour de la classification des chemins pour que l'outil fournisse les

itinéraires les plus adéquats tout en tenant compte des mises à jour. Cette gestion en direct des voiries forestières est intéressante car on se retrouve souvent confronté à la présence de barrières à l'entrée de forêts privées, à des chemins temporairement inaccessibles en période de chasse ou encore à des chemins devenus impraticables à la suite d'épisodes climatiques catastrophiques tels que ceux de cet été 2021. Sur base de ces constatations, le calculateur choisirait, en fonction des contraintes, un itinéraire alternatif. De plus, le signalement de ces obstructions ou de ces dégradations permettrait aux pouvoirs publics responsables de cibler efficacement les points noirs du réseau et de les résoudre, à l'image de l'application « FixMyStreet » lancée dans les différentes régions de Belgique. Celle-ci est basée sur les constatations d'utilisateurs qui peuvent signaler des problèmes divers dans l'espace public (fixmystreetwallonie.be, 2021).

5. Conclusion

Dans ce travail, une analyse spatiale du réseau de dessertes forestières de la commune de Nassogne a été réalisée. Pour celle-ci, les données utilisées émanent de la plateforme OpenStreetMap (OSM), du Département de la Nature et des Forêts (DNF), du portail WalOnMap, mais également des vérifications de terrain effectuées dans le cadre de l'étude. Cette étape a été suivie par l'élaboration d'un outil de guidage dédié aux grumiers grâce à l'extension pgRouting, qui permet l'analyse d'un réseau routier.

Premièrement, ce travail fournit une étude approfondie du massif forestier ainsi que des éléments qui constituent la desserte forestière de la commune de Nassogne. Il met en exergue le caractère forestier de cette commune qui, au sein de ses massifs forestiers étendus, possède un réseau de dessertes permettant une bonne mobilisation de ses bois, malgré quelques zones de faiblesse.

Deuxièmement, cette étude a également souligné également l'intérêt du projet de cartographie collaboratif OpenStreetMap dans le cadre d'une analyse spatiale du réseau de voiries sur un territoire étendu tel qu'à l'échelle d'une commune. En effet, les vérifications de terrain et les analyses de précision géométrique ont mis en avant la fiabilité des données émanant de cette plateforme.

Ensuite, le travail a montré l'intérêt de l'utilisation de l'extension pgRouting dans la réalisation d'un outil d'aide à la navigation dédié au transport du bois. En effet, les multiples algorithmes repris par ce programme et la grande plasticité des éléments à prendre en compte que celui-ci tolère, permet d'adapter l'outil à toutes sortes d'utilisation.

Enfin, des perspectives quant à l'utilisation des données OSM dans des outils d'aide à la navigation sont à prévoir. De fait, cette base de données déjà riche en informations pourrait tendre à s'améliorer davantage, en témoignent les résultats encourageants obtenus lors de nombreuses études. Ainsi, cette base de données pourrait être à la base d'un serveur favorisant encore une meilleure mobilisation et valorisation de nos bois wallons, sur un marché grandissant.

Bibliographie

- Académie française, 2021. Dictionnaire de l'Académie française. <http://www.dictionnaire-academie.fr/article/A9O0765>, (22/09/2021).
- Basiri A., Jackson M., Pouria A., Pourabdollah A., Sester M., Winstanley A., Moore T. & Zhang L., 2016. Quality assessment of OpenStreetMap data using trajectory mining. *Geo-Spat. Inf. Sci.* **19**, 56–68, DOI:10.1080/10095020.2016.1151213.
- Breyne J., Abildtrup J. & Dufrêne M., 2021. L'écotourisme en Ardenne: les chiffres clés 24.
- Brovelli M.A., Minghini M. & Molinari M.E., 2016. An automated grass-based procedure to assess the geometrical accuracy of the openstreetmap paris road network. *ISPRS - Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spat. Inf. Sci.* **XLI-B7**, 919–925, DOI:10.5194/isprsarchives-XLI-B7-919-2016.
- Centre de recherches routières, 2014. Code de bonne pratique pour la protection des routes contre les effets de l'eau.
- Code de la route.be, 2021a. Article 32bis. Dimensions et masses des véhicules dont la demande d'agrément est introduite à partir du 1er janvier 1985. <https://code-de-la-route.be/actualite/modifications-recentes/309>, (26/09/2021).
- Code de la route.be, 2021b. Article 11. Limitations de vitesse. <https://www.code-de-la-route.be/textes-legaux/sections/ar/code-de-la-route/170-art11-v15-170>, (16/10/2021).
- code forestier, 2021. Législation/Eau/Circulation sur les cours d'eau/Autorisations. <http://environnement.wallonie.be/legis/eau/eacir004.htm>, (14/11/2021).
- Colson V., Braun M., Debaty J. & Lejeune P., 2011. Identification des zones déficitaires en desserte forestière à l'échelle d'un territoire communal 11.
- Commune de Nassogne, 2016. Plan communal de développement de la nature.
- CRPF Nord - Pas de Calais Picardie, 2005. La desserte forestière Accéder à son bois pour le valoriser.
- CRPF Nord - Pas de Calais Picardie, 2012. Pourquoi élargir vos pistes forestières ?
- Dagnelie P., Palm R. & Rondeux J., 2013. *Cubage des arbres et des peuplements forestiers: tables et équations*, Gembloux: Presses agronomiques de Gembloux.
- Dedry L., Thier O.D., Perin J., Michez A., Bonnet S. & Lejeune P., 2015. ForEstimator : un nouvel outil cartographique pour mieux connaître la forêt wallonne. *Forêt.Nature* (135), 7.
- Deluzarche C., 2021. Définition heuristique. *Futura Sci.* <https://www.futura-sciences.com/sciences/definitions/mathematiques-heuristique-545/>, (04/12/2021).
- Documentation de QGIS, 2021. GDAL analyse. https://docs.qgis.org/2.18/fr/docs/user_manual/processing_algs/gdalogr/gdal_analysis.html, (15/10/2021).
- Durviaux L., Kohl B. & Fisse D., 2010. Voirie : Le point sur la responsabilité des pouvoirs publics 46.
- Editions Eyrolles, 2021. SURLARGEUR - Dictionnaire du BTP. <https://www.editions-eyrolles.com/Dico-BTP/definition.html?id=8594>, (03/12/2021).
- Evans D.L., Roberts S.D. & Parker R.C., 2006. LiDAR : A new tool for forest measurements? *For. Chron.* **82**(2), 211–218, DOI:10.5558/tfc82211-2.

FCBA, 2021. NaviForest : Cartographie numérique pour le transport des bois - Institut Technologique FCBA. <https://www.fcba.fr/>. <https://www.fcba.fr/travaux/naviforest-cartographie-numerique-pour-le-transport-des-bois/>, (15/12/2021).

Fédération Nationale Entrepreneurs Des Territoires, 2012. Optimisation de la desserte forestière et de ses équipements.

FIBRA (Fédération forêt-bois Rhône-Alpes), 2017. Bonnes pratiques techniques. Voiries et places de dépôt forestières. Caractéristiques en fonction des usages.

FIBRA (Fédération forêt-bois Rhône-Alpes), n.d. Desserte forestière.

fixmystreetwallonie.be, 2021. Tous les signalements - FixMyStreet Wallonie. <https://www.fixmystreetwallonie.be/tous-les-signalements/>, (13/12/2021).

Garmin Ltd, 2021. Précision GPS | Garmin Support. <https://support.garmin.com/fr-BE/?faq=aZc8RezeAb9LjCDpJpITY7>, (03/11/2021).

Gembloux Agro Bio-Tech, 2021. Forestimator. <http://forestimator.gembloux.ulg.ac.be/>, (18/10/2021).

Géoportail de la Wallonie, 2021. Follow the LiDAR. <http://geoportail.wallonie.be/home/ressources/georeferentiel-de-la-wallonie/relief/FTL.html>, (15/12/2021).

geoserver.org, 2021. À propos - GeoServer. <http://geoserver.org/about/>, (15/11/2021).

Inventaire permanent des ressources forestières de Wallonie, 2021. Points forestiers non productifs. http://iprfw.spw.wallonie.be/fiche_8_27.php, (20/09/2021).

IRM, 2021. IRM - Climat dans votre commune. KMI. <https://www.meteo.be/fr/climat/climat-de-la-belgique/climat-dans-votre-commune>, (05/09/2021).

Natagriwal, 2017. Mesures de gestion dans le réseau Natura 2000.

NaviForest.fr, 2021. NaviForest. <https://naviforest.ign.fr/#article-3>, (15/12/2021).

Nink S., 2017. REGIOWOOD II – Ein projekt für den schutz und die valorisierung des waldes der grossregion.

Nivelle J.-L., Gerard E. & Ninane F., 1988. La voirie en forêt domaniale et dans les forêts des administrations subordonnées. *Bull. Société R. For. Belg.* **95**(3), 105–127.

Normandin D., 1993. Using OPTIROUT in economically optimising forest roads networks. <https://doi.org/10.4267/2042/26481>

Office économique wallon du bois, 2021. Panorabois 2021.

ONF, 2017. Tassement, orniérage, machinisme forestier et organisation des exploitations en forêts feuillues de plaine et collines. *Rendez-vous techniques* (54), 75.

ONF, 2020. La multifonctionnalité ou comment la forêt nous rend de nombreux et précieux services. *Off. Natl. For.* <https://www.onf.fr/onf/+7ea::la-multifonctionnalite-ou-comment-la-foret-nous-rend-de-nombreux-et-precieux-services.html>, (24/08/2021).

ONF, 2021. ONF - Organiser la fréquentation et la cohabitation entre usagers. http://www1.onf.fr/enforet/meudon/comprendre/accueil_paysages/20110907-100958-674875/@@index.html, (03/12/2021).

ONF & FCBA, 2009. Guide Prosol.

OpenStreetMap Wiki, 2021. OpenStreetMap Wiki. <https://wiki.openstreetmap.org/wiki/Key:highway>, (04/12/2021).

OSEYS, 2021. Outils d'aide à la décision. OSEYS. <https://oseys.fr/nos-outils-de-pilotage/outils-daide-a-la-decision/>, (13/12/2021).

OSGeo, 2021. pgRouting - OSGeo. <https://www.osgeo.org/projects/pgrouting/>, (17/11/2021).

Perin J., Thier O.D., Claessens H., Lejeune P. & Hébert J., 2014. Nouvelles courbes de productivité harmonisées pour le douglas, l'épicéa et les mélèzes en Wallonie 16.

Petit O., Billon P. & Follin J.-M., 2012. Évaluation de la qualité des données OpenStreetMap sur la Sarthe et réflexion sur le processus de contribution. XYZ 24–34.

pgRouting.org, 2021. pgr_dijkstra — Manuel de pgRouting (3.3). https://docs.pgrouting.org/latest/en/pgr_dijkstra.html, (25/11/2021).

Préfet des Bouches-du-Rhône, 2014. Mesures relatives aux infrastructures et équipements de lutte contre les incendies de forêt.

Pro Bos, 2020a. Des accès sécurisés pour une gestion durable des massifs forestiers à l'échelle d'un territoire (Fiches).

Pro Bos, 2020b. Des accès sécurisés pour une gestion durable des massifs forestiers à l'échelle d'un territoire.

Région Wallonne, 2021. Législation/Code forestier. <http://environnement.wallonie.be/legis/dnf/forets/foret025.htm>, (19/11/2021).

Répertoire Géoservices infraSIG, 2021. Legend (SOL_SOUS_SOL/CNSW__PRINC_TYPES_SOLs). https://geoservices.wallonie.be/arcgis/rest/services/SOL_SOUS_SOL/CNSW__PRINC_TYPES_SOL/MapServer/legend, (15/12/2021).

Rondeux J., 1977. Construction et utilisation de tarifs de cubage “peuplements” pour l'épicéa (*Picea Abies* Karst.) en Ardenne méridionale. *Bull. Rech. Agron. Gembloux* **12**(4), 339–348.

Rondeux J., 2021. *La mesure des arbres et des peuplements forestiers*, Presses Universitaires de Liège - Presses Agronomiques de Gembloux.

Rotaru C., 1985. Les phénomènes de tassement du sol forestier dus à l'exploitation mécanisée du bois. *Rev. For. Fr.* (5), 359, DOI:10.4267/2042/21823.

Salberg A.-B., Trier Ø.D. & Kampffmeyer M., 2017. Large-Scale Mapping of Small Roads in Lidar Images Using Deep Convolutional Neural Networks. *Image Anal., Lecture Notes in Computer Science* **10270**, 193–204, DOI:10.1007/978-3-319-59129-2_17.

Service public de Wallonie, 2013. Aménagement de la forêt communale de Nassogne.

Service public de Wallonie, 2021a. Circuler en forêt en Wallonie. <https://www.wallonie.be/fr/demarches/circuler-en-foret-en-wallonie>, (05/12/2021).

Service public de Wallonie, 2021b. Géoportail de la Wallonie. <http://geoportail.wallonie.be/home.html>, (13/10/2021).

Service public de Wallonie, 2021c. Relief de la Wallonie - Modèle Numérique de Surface (MNS) 2013-2014. <http://geoportail.wallonie.be/catalogue/7d23d8ab-962a-493f-8771-2054e06ad36f.html>, (04/11/2021).

Singh P.S., Lyngdoh R.B., Chutia D., Saikhom V., Kashyap B. & Sudhakar S., 2015. Dynamic shortest route finder using pgRouting for emergency management. *Appl. Geomat.* **7**(4), 255–262, DOI:10.1007/s12518-015-0161-4.

Tousapied.be, 2021. Qu'est-ce qu'une voirie communale ? *Tous À Pied*. <https://www.tousapied.be/faqs/quest-ce-quune-voirie-communale/>, (20/09/2021).

Ur Rehman A., Awuah-Offei K., Baker D. & Bristow D., 2018. Emergency evacuation guidance system for underground miners.

Vargas J., Srivastava S., Tuia D. & Falcao A., 2020. OpenStreetMap: Challenges and Opportunities in Machine Learning and Remote Sensing. *IEEE Geosci. Remote Sens. Mag.* **9**(1), 184–199, DOI:10.1109/MGRS.2020.2994107.

Wallex, 2021. Décret relatif à la voirie communale. <https://wallex.wallonie.be/eli/loi-decret/2014/02/06/2014201445/2014/04/01?doc=27377&rev=>, (20/09/2021).

Annexes

Annexe 1. Script de la page .html pour l’outil de guidage

```
<!DOCTYPE html>

<html>

<head>

<title>Recherche d’itinéraire avec pgRouting </title>

<meta charset= "utf-8">

<style>

#map {

width: 100%;

height: 800px;}

</style>

</head>

<body>

<div id= "map" class ="map"></div>

<div id="desc">Cliquez sur la carte pour définir le point de départ – cliquez à nouveau pour définir le
point d’arrivée – la route sera tracée en bleu</div><div align="left"><div align= "right"><img src= "gbx.png " id= "image "
width= "145" height= "60"></div>

<div id="desc"> </div>

<div id="desc"> </div> <button id= "clear">Effacer</button>

<script
src="https://cdn.jsdelivr.net/gh/openlayers/openlayers.github.io@master/en/v6.9.0/build/ol.js"></scrip
t>

<link rel="stylesheet"
href="https://cdn.jsdelivr.net/gh/openlayers/openlayers.github.io@master/en/v6.9.0/css/ol.css">

<script type= "text/javascript ">

//Carte OSM

var osm = new ol.layer.Tile({

source: new ol.source.OSM()
```

```
});
```

```
/* Déclaration de la source de la couche en format WMS */
```

```
var sourceWMS = new ol.source.ImageWMS({  
    /* Chargement du lien WMS */  
    url: 'http://localhost:8080/geoserver/openlayers/wms',  
    /* Chargement de l'espace de travail : couche */  
    params: {'LAYERS': 'openlayers:quais_final', 'TILED': true, 'styles' :  
    'quai'},  
    serverType: 'geoserver'  
})
```

```
/* Déclaration de la couche WMS */
```

```
var coucheWMS = new ol.layer.Image({ source: sourceWMS });
```

```
var stock = new ol.source.ImageWMS({  
    /* Chargement du lien WMS */  
    url: 'http://localhost:8080/geoserver/openlayers/wms',  
    /* Chargement de l'espace de travail : couche */  
    params: {'LAYERS': 'openlayers:stockage_final', 'TILED': true,  
    'styles' : 'stock'},  
    serverType: 'geoserver'  
})
```

```
/* Déclaration de la couche WMS */
```

```
var coucheWMtS = new ol.layer.Image({ source: stock });
```

```
var hydro = new ol.source.ImageWMS({  
    /* Chargement du lien WMS */  
    url: 'http://localhost:8080/geoserver/openlayers/wms',  
    /* Chargement de l'espace de travail : couche */  
    params: {'LAYERS': 'openlayers:hydro', 'TILED': true, 'styles' :  
    'hydro'},
```



```

        serverType: 'geoserver'
    })

    /* Déclaration de la couche WMS */
    var hydroWMS = new ol.layer.Image({ source: hydro});

var couches = [osm, coucheWMtS,hydroWMS,coucheWMS];

    /* Déclaration de la carte */
    var map = new ol.Map({
        /* Appel des couches de la carte */
        layers: couches,
        /* Cible de la div map */
        target: 'map',
        /* Caractéristiques de la vue de la carte */
        view: new ol.View({
            center: ol.proj.transform([5.3477,50.1435], 'EPSG:4326', 'EPSG:3857'),
            zoom: 13
        }),

        controls: ol.control.defaults({
            attributionOptions: {
                collapsible: false
            }
        })
    });

var params = {
    LAYERS: 'final:end',

```

```

    FORMAT: 'image/png'
  };

  // Les points de départ et d'arrivée.
  var startPoint = new ol.Feature();
  var destPoint = new ol.Feature();

  // The vector layer used to display the "start" and "destination" features.
  var vectorLayer = new ol.layer.Vector({
    source: new ol.source.Vector({
      features: [startPoint, destPoint]
    })
  });

  map.addLayer(vectorLayer);

  // A transform function to convert coordinates from EPSG:3857
  // to EPSG:4326.
  var transform = ol.proj.getTransform('EPSG:3857', 'EPSG:4326');

  // Register a map click listener.
  map.on('click', function(event) {
    if (startPoint.getGeometry() == null) {
      // First click.
      startPoint.setGeometry(new ol.geom.Point(event.coordinate));
    } else if (destPoint.getGeometry() == null) {
      // Second click.
      destPoint.setGeometry(new ol.geom.Point(event.coordinate));
      // Transform the coordinates from the map projection (EPSG:3857)
      // to the server projection (EPSG:4326).
      var startCoord = transform(startPoint.getGeometry().getCoordinates());
      var destCoord = transform(destPoint.getGeometry().getCoordinates());
      var viewparams = [
        'x1:' + startCoord[0], 'y1:' + startCoord[1],

```

```

        'x2:' + destCoord[0], 'y2:' + destCoord[1]
    ];
    params.viewparams = viewparams.join(';');
    result = new ol.layer.Image({
        source: new ol.source.ImageWMS({
            url: 'http://localhost:8080/geoserver/final/wms',
            params: params
        })
    });
    map.addLayer(result);
}
});

```

```

var clearButton = document.getElementById("clear");
clearButton.addEventListener("click", function(event) {
    // Reset the "start" and "destination" features.
    startPoint.setGeometry(null);
    destPoint.setGeometry(null);
    // Remove the result layer.
    map.removeLayer(result);
});
</script>
</body>
</html>

```

Annexe 2. Fichier « mapconfig.xml » utilisé pour charger les voiries sélectionnées dans pgRouting

```
<?xml version="1.0" encoding="UTF-8"?>
<configuration>
  <tag_name name="highway" id="1">
    <tag_value name="motorway" id="101" priority="1.0" maxspeed="120" />
    <tag_value name="motorway_link" id="102" priority="1.0" maxspeed="120" />
    <tag_value name="motorway_junction" id="103" priority="1.0" maxspeed="120" />
    <tag_value name="trunk" id="104" priority="1.05" maxspeed="120" />
    <tag_value name="trunk_link" id="105" priority="1.05" maxspeed="120" />
    <tag_value name="primary" id="106" priority="1.15" maxspeed="90" />
    <tag_value name="primary_link" id="107" priority="1.15" maxspeed="90" />
    <tag_value name="secondary" id="108" priority="1.5" maxspeed="90" />
    <tag_value name="secondary_link" id="109" priority="1.5" maxspeed="90"/>
    <tag_value name="tertiary" id="110" priority="1.75" maxspeed="90" />
    <tag_value name="tertiary_link" id="111" priority="1.75" maxspeed="90" />
    <tag_value name="residential" id="112" priority="2.5" maxspeed="50" />
    <tag_value name="living_street" id="113" priority="3" maxspeed="20" />
    <tag_value name="service" id="114" priority="2.5" maxspeed="50" />

    <tag_value name="unclassified" id="117" priority="3" maxspeed="90"/>
    <tag_value name="road" id="100" priority="5" maxspeed="50" />
  </tag_name>
  <tag_name name="tracktype" id="3">
    <tag_value name="grade1" id="301" />
    <tag_value name="grade2" id="302" />
  </tag_name>
</configuration>
```

Annexe 3. Légende des principaux types de sols en Wallonie (Source : (Répertoire Géoservices infraSIG, 2021)

Principaux Types de Sols de Wallonie à 1:250.000 (0)

-  Sols tourbeux ou tourbières
-  Sols sableux ou limono-sableux à drainage naturel excessif ou légèrement excessif
-  Sols sableux ou limono-sableux à drainage naturel principalement modéré ou imparfait
-  Sols sablo-limoneux à drainage naturel principalement favorable
-  Sols sablo-limoneux à drainage naturel principalement modéré ou imparfait
-  Sols limoneux à drainage naturel favorable
-  Sols limoneux à drainage naturel modéré ou imparfait
-  Sols limoneux à drainage naturel assez pauvre à très pauvre
-  Sols argileux à drainage naturel favorable à imparfait
-  Sols argileux à drainage naturel assez pauvre à très pauvre
-  Sols limoneux peu caillouteux à drainage naturel favorable
-  Sols limoneux peu caillouteux à drainage naturel principalement modéré à assez pauvre
-  Sols limono-caillouteux à charge schisto-phylladeuse et à drainage naturel quasi-exclusivement favorable
-  Sols limono-caillouteux à charge schisto-gréseuse ou gréseuse et à drainage naturel favorable
-  Sols limono-caillouteux à charge schisto-gréseuse ou gréseuse et à drainage naturel modéré à assez pauvre
-  Sols limono-caillouteux à charge schisteuse et à drainage naturel principalement favorable
-  Sols limono-caillouteux à charge psammitique ou schisto-psammitique et à drainage naturel principalement favorable
-  Sols limono-caillouteux à charge calcaire ou contenant du calcaire et à drainage naturel quasi-exclusivement favorable
-  Sols limono-caillouteux à charge de silexite ou de gravier ou de conglomérat et à drainage naturel principalement favorable
-  Sols limono-caillouteux à charge de grès calcaire ou de grès argilo-calcaire et à drainage naturel favorable à imparfait
-  Sols limono-caillouteux à charge crayeuse et à drainage naturel favorable
-  Regroupement de complexes de sols de textures différentes ou sur fortes pentes et de sols de fonds de vallons limoneux ou rocailleux
-  Sols artificiels ou non cartographiés