

Évaluation du potentiel du drone pour l'analyse d'espaces verts urbains, à travers le domaine de l'Architecture de Paysage

Auteur : Philippot, Jeanne

Promoteur(s) : Bastin, Jean-François

Faculté : Gembloux Agro-Bio Tech (GxABT)

Diplôme : Master architecte paysagiste, à finalité spécialisée

Année académique : 2023-2024

URI/URL : <http://hdl.handle.net/2268.2/21180>

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.



ÉVALUATION DU POTENTIEL DU DRONE POUR L'ANALYSE D'ESPACES VERTS URBAINS, À TRAVERS LE DOMAINE DE L'ARCHITECTURE DE PAYSAGE.

JEANNE PHILIPPOT

TRAVAIL DE FIN D'ÉTUDES PRÉSENTÉ EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLÔME DE
MASTER D'ARCHITECTE PAYSAGISTE

ANNÉE ACADÉMIQUE 2023-2024

PROMOTEUR : JEAN-FRANÇOIS BASTIN
CO-PROMOTEUR : HAROLD STRAMMER

“Toute reproduction du présent document, par quelque procédé que ce soit, ne peut être autorisée qu’avec l’autorisation de l’auteur-e et du Président ou de la Présidente du Comité de Gestion de la formation d'Architecte Paysagiste.”

ÉVALUATION DU POTENTIEL DU DRONE POUR L'ANALYSE
D'ESPACES VERTS URBAINS, À TRAVERS LE DOMAINE DE
L'ARCHITECTURE DE PAYSAGE.

REMERCIEMENTS

Je tiens à exprimer mes remerciements les plus sincères à mon promoteur, Jean-François Bastin, ainsi qu'à mon co-promoteur, Harold Strammer, pour leur accompagnement, leur bienveillance et leur soutien constant tout au long de ce travail.

Je souhaite également exprimer ma gratitude à l'ensemble de l'équipe PIRATES pour leurs précieux conseils, et les échanges enrichissants partagés lors des réunions d'équipe. Je tiens à remercier tout particulièrement Hugo et Antoine, pour leur accueil chaleureux, leur aide précieuse et leur patience inébranlable face à mes nombreuses questions.

Mille mercis à Guillaume pour son temps, son accompagnement et son aide précieuse dans la réalisation des vols de drone.

Merci à Monsieur Cédric Geert pour sa gentillesse, sa pédagogie et son aide concernant l'utilisation du matériel forestier.

J'exprime également ma gratitude envers Monsieur Christoph Menzel, pour avoir accepté le rôle de lecteur pour mon travail.

Merci à l'ensemble de mes amis étudiants paysagistes, pour les bons moments passés ensemble, en particulier à Louis, pour sa bonne humeur, son soutien sans faille et pour avoir partagé avec moi mes plus belles aventures.

Merci également à mes amis bioingénieurs, pour leur accueil en salle TFiste, les bons moments partagés lors de nos séances de rédaction et pour leurs réponses à mes nombreuses questions.

Enfin, un merci tout particulier à ma famille, pour m'avoir permis de réaliser ces études, et pour leur soutien et leurs encouragements tout au long de ces cinq années. Merci à ma sœur Adèle, pour son aide précieuse dans la réalisation de ce travail. Pour finir, merci à James pour son aide lors des inventaires de terrain, et pour son soutien et ses mots encourageants à mon égard.

ABSTRACT

The presence of vegetation in urban areas provides numerous ecosystem services, making it crucial for landscape architects to preserve, enrich, or introduce more of it. To achieve this, efficient methods in terms of time, cost, and accuracy are essential. However, traditional analysis tools and methods, such as maps from the Walloon Public Service or field inventories, lack precision at the urban scale or are too costly and time-consuming. The aim of this work is to evaluate the potential of drones for small-scale urban vegetation landscape analysis within the field of landscape architecture.

The study was conducted over an area of 150 hectares south of the city center of Liège and was structured around two approaches : quantitative and qualitative. The quantitative approach assessed the accuracy of vegetation structure and composition, with data obtained through photogrammetry by comparing six indicators derived from the drone with reference data from field inventories or public maps. Eighteen 0.25-hectare plots were analyzed. The qualitative approach evaluated several 3D renderings generated by the drone, comparing minimalist and maximalist flight parameters for landscape structures ranging from 0.25 to 2.5 hectares.

The results of the quantitative study highlight that the accuracy of data generated by the drone is nearly equivalent to that of field data, particularly in environments with low, undiversified tree canopy coverage. It also demonstrates that the drone provides superior accuracy compared to publicly available maps, except for values obtained from Digital Terrain Models. The 3D renderings reveal a high quality of reconstruction and suggest that minimalist parameters are sufficient for open environments, while wooded areas require maximalist parameters.

This study confirms the potential of drones as an innovative tool for the landscape analysis of small urban vegetation plots, providing an initial approach that suggests avenues for improvement and further research.

keywords: drone, photogrammetry, remote sensing, green spaces, vegetation, urban, analysis, landscape architecture.

RÉSUMÉ

La présence de végétation en milieu urbain offre de nombreux services écosystémiques, il est donc primordial pour le paysagiste de la préserver, de l'enrichir ou d'en introduire davantage. Pour cela, des méthodes d'analyse, efficaces en termes de temps, coûts et précision, sont essentielles. Cependant, les outils et méthodes d'analyse traditionnels, comme les cartographies du Service Public de Wallonie ou les inventaires de terrain, manquent soit de précision à l'échelle urbaine, soit sont trop coûteuses et chronophages. L'objectif de ce travail est d'évaluer le potentiel du drone, pour l'analyse paysagère de végétation urbaine à petite échelle, à travers le domaine de l'architecture de paysage.

L'étude s'est déroulée sur un périmètre de 150 hectares au sud du centre-ville de Liège, et s'est articulée autour de deux approches : quantitative et qualitative. L'approche quantitative a évalué la précision des données sur la structure et la composition de la végétation obtenues par photogrammétrie, en comparant les valeurs de six indicateurs obtenues grâce au drone avec des données de référence issues d'inventaires de terrain ou des cartographies publiques. Dix-huit parcelles de 0,25 hectare ont été analysées. L'approche qualitative a évalué plusieurs rendus 3D générés par le drone, en comparant des paramètres de vol minimalistes et maximalistes pour des structures paysagères de 0,25 à 2,5 hectares.

Les résultats de l'étude quantitative soulignent une précision des données générées par le drone quasiment équivalente à celle des données de terrain, en particulier dans le cas d'environnements avec un recouvrement de la strate arborée peu important, peu diversifié, et de faible hauteur. Elle démontre également une précision supérieure du drone par rapport aux cartographies publiques disponibles en ligne, à l'exception des valeurs obtenues pour les Modèles Numériques de Terrain. Les rendus 3D révèlent une qualité de reconstruction élevée, et suggèrent que des paramètres minimalistes suffisent pour des environnements ouverts, tandis que des environnements boisés nécessitent des paramètres maximalistes.

Cette étude confirme le potentiel du drone comme outil innovant pour l'analyse paysagère de petites parcelles de végétation urbaine, et constitue une première approche, qui suggère des pistes d'amélioration et d'approfondissement pour de potentielles futures recherches.

mots clés : drone, photogrammétrie, télédétection, espaces verts, végétation, urbain, analyse, architecture de paysage.

TABLE DES MATIÈRES

1. INTRODUCTION.....	1
1.1. CONTEXTE.....	1
1.2. ÉTAT DE L'ART.....	3
2. OBJECTIF DE L'ÉTUDE.....	5
3. MATÉRIEL ET MÉTHODE.....	6
3.1. AIRE D'ÉTUDE.....	6
3.1.1. LOCALISATION.....	6
3.1.2. CLIMAT.....	6
3.1.3. CONTEXTE.....	7
3.2. PÉRIMÈTRE D'ÉTUDE.....	7
3.2.1. TYPOLOGIES VÉGÉTALES.....	8
3.2.1.1. matrice-patch-corridor.....	8
3.2.1.2. identification de six typologies.....	9
3.3. RESSOURCES INFORMATIQUES.....	11
3.4. DESIGN D'ÉCHANTILLONNAGE.....	11
3.4.1. APPROCHE QUANTITATIVE.....	11
3.4.2. APPROCHE QUALITATIVE.....	12
3.5. SÉLECTION DES INDICATEURS.....	13
3.5.1. APPROCHE QUANTITATIVE.....	13
3.5.1.1. nombre d'arbres.....	14
3.5.1.2. richesse en espèces.....	14
3.5.1.3. structure verticale.....	14
3.5.1.4. aire de la couronne.....	14
3.5.1.5. recouvrement végétal.....	14
3.5.1.6. topographie.....	14
3.5.2. APPROCHE QUALITATIVE.....	14
3.6. COLLECTES DES DONNÉES DE DRONE.....	15
3.6.1. RÈGLEMENTS ET CONTRAINTES APPLIQUÉES AUX VOLS.....	15
3.6.1.1. conditions législatives.....	15
3.6.1.2. conditions météorologiques.....	15
3.6.1.3. contraintes techniques.....	15
3.6.2. PLANS DE VOL.....	16
3.6.2.1. approche quantitative.....	18
3.6.2.2. approche qualitative.....	18
3.6.3. TRAITEMENT DES DONNÉES DE VOL.....	19
3.6.3.1. approche quantitative.....	19
3.6.3.2. approche qualitative.....	20
3.6.4. COLLECTE DE DONNÉES.....	21
3.6.4.1. approche quantitative.....	21
3.6.4.1.1. nombre d'arbres.....	21

3.6.4.1.2. richesse en espèces.....	22
3.6.4.1.3. structure verticale.....	23
3.6.4.1.4. aire de la couronne.....	25
3.6.4.1.5. recouvrement végétal.....	26
3.6.4.1.6. topographie.....	26
3.6.4.2. approche qualitative.....	27
3.6.4.2.1. données de capture.....	27
3.6.4.2.2. observations des reconstructions 3d.....	28
3.7. MISE EN FORME DES RÉSULTATS.....	28
3.7.1. APPROCHE QUANTITATIVE.....	28
3.7.2. APPROCHE QUALITATIVE.....	28
4. RÉSULTATS.....	29
4.1. APPROCHE QUANTITATIVE.....	29
4.1.1. NOMBRE D'ARBRES.....	29
4.1.2. RICHESSE EN ESPÈCE.....	30
4.1.3. STRUCTURE VERTICALE.....	31
4.1.4. AIRE DE LA COURONNE.....	33
4.1.5. RECOUVREMENT VÉGÉTAL.....	34
4.1.6. TOPOGRAPHIE.....	36
4.2. APPROCHE QUALITATIVE.....	38
4.2.1. DONNÉES DE CAPTURES.....	38
4.2.2. OBSERVATIONS 3D.....	40
5. DISCUSSION.....	45
5.1. INTERPRÉTATION DES RÉSULTATS.....	45
5.1.1. APPROCHE QUANTITATIVE.....	45
5.1.2. APPROCHE QUALITATIVE.....	47
5.2. RÉPONSE AUX OBJECTIFS DE L'ÉTUDE.....	48
5.3. LIMITES DE L'ÉTUDE.....	49
6. PERSPECTIVES.....	50
7. CONCLUSION.....	51
8. CONTRIBUTION DE L'ÉTUDIANTE.....	52
9. BIBLIOGRAPHIE.....	53
ANNEXES.....	58

TABLE DES FIGURES

<u>Figure 1</u> :	La photogrammétrie, schéma explicatif.	3
<u>Figure 2</u> :	Diagramme ombrothermique de la Ville de Liège.	6
<u>Figure 3</u> :	Carte de localisation des espaces verts du centre-ville de Liège.	7
<u>Figure 4</u> :	Carte de localisation du périmètre d'étude.	8
<u>Figure 5</u> :	Traduction des espaces verts publics présents au sein du périmètre d'étude sous forme de taches et de corridors, conformément au concept de matrice-patch-corridor en écologie du paysage.	9
<u>Figure 6</u> :	Photographie typologie alignement d'arbres de rue	10
<u>Figure 7</u> :	Photographie typologie berge végétalisée	10
<u>Figure 8</u> :	Photographie typologie parc linéaire	10
<u>Figure 9</u> :	Photographie typologie zone boisée.	11
<u>Figure 10</u> :	Photographie typologie zone ouverte.	11
<u>Figure 11</u> :	Photographie typologie zone de jardin.	11
<u>Figure 12</u> :	Détermination des six typologies de végétation urbaine : schéma synthétique.	11
<u>Figure 13</u> :	Carte de localisation des 18 quadrats d'observation aléatoirement sélectionnés, parmi les six typologies de végétation urbaine identifiées.	12
<u>Figure 14</u> :	Carte de localisation des 3 quadrats d'observation sélectionnés pour l'approche qualitative d'une superficie de 0,25 hectare, étendue à 2 ou 2,5 hectares pour la méthode maximaliste.	13
<u>Figure 15</u> :	Le recouvrement d'images, schéma explicatif.	16
<u>Figure 16</u> :	Les différents types de trajectoire de vol par drone, schéma explicatif.	17
<u>Figure 17</u> :	Orientations nadir et oblique, schéma explicatif.	17
<u>Figure 18</u> :	Modèle Numérique de Terrain du quadrat A, généré par photogrammétrie à partir des images capturées par le drone.	20
<u>Figure 19</u> :	Modèle Numérique de Surface du quadrat A, généré par photogrammétrie à partir des images capturées par le drone.	20
<u>Figure 20</u> :	Orthomosaïque du quadrat A, générée par photogrammétrie à partir des images capturées par le drone.	20
<u>Figure 21</u> :	Maillage 3D, schéma explicatif.	20
<u>Figure 22</u> :	Identification du nombre d'arbres dans le quadrat A à l'aide de l'orthomosaïque générée à partir des données drone.	21
<u>Figure 23</u> :	Identification du nombre d'arbres dans le quadrat A à l'aide du MNS généré à partir des données drone.	21
<u>Figure 24</u> :	Localisation du nombre d'arbres dans le quadrat A à partir d'inventaires de terrain, à l'aide du GPS Garmin.	22

<u>Figure 25</u> : Localisation du nombre d'arbres dans le quadrat A à partir d'inventaires de terrain, à l'aide du GPS Garmin et ensuite rectifiée à partir de l'observation de l'orthomosaïque générée à partir des données drone.	22
<u>Figure 26</u> : Identification du nombre d'espèces d'arbres présentes dans le quadrat A à l'aide de l'orthomosaïque générée à partir des données drone.	22
<u>Figure 27</u> : Modèle Numérique de Surface, Modèle Numérique de Terrain et Modèle Numérique de Hauteur, schéma explicatif.	24
<u>Figure 28</u> : Fonctionnement du vertex forestier, schéma explicatif.	25
<u>Figure 29</u> : Identification de l'aire de la couronne de l'arbre sélectionné pour le quadrat A, à l'aide de l'orthomosaïque générée à partir des données drone.	25
<u>Figure 30</u> : Identification du pourcentage de recouvrement de chaque strate végétale présente au sein du quadrat A, à l'aide de l'orthomosaïque générée à partir des données drone.	26
<u>Figure 31</u> : Identification du pourcentage de recouvrement de chaque strate végétale présente au sein du quadrat A, à partir d'inventaires de terrain.	26
<u>Figure 32</u> : Modèle Numérique de Terrain du quadrat A, généré à l'aide des données drone, et localisation des 3 points aléatoirement sélectionnés pour l'indicateur de topographie.	27
<u>Figure 33</u> : Modèle Numérique de Terrain du quadrat A, généré à l'aide des données LiDAR 2021, et localisation des 3 points aléatoirement sélectionnés pour l'indicateur de topographie.	27
<u>Figure 34</u> : Diagramme de dispersion du nombre d'arbres présents dans chaque typologie de végétation, obtenu à partir d'inventaires de terrain (axe des x) et d'observations des orthomosaïques et des MNS générés à partir des images capturées par le drone (axe des y).	29
<u>Figure 35</u> : Diagramme de dispersion du nombre d'espèces d'arbre présentes dans chaque typologie de végétation, obtenu à partir d'inventaires de terrain (axe des x) et d'observations des orthomosaïques générées à partir des images capturées par le drone (axe des y).	30
<u>Figure 36</u> : Diagramme de dispersion de la hauteur des arbres présents dans chaque typologie de végétation, obtenue à partir des valeurs du MNH généré à partir de données LiDAR de 2021 (axe des x) et des valeurs des MNS générés à partir des images capturées par le drone (axe des y).	31
<u>Figure 37</u> : Diagramme de dispersion de la hauteur d'un arbre par quadrat, obtenue à partir d'inventaires de terrain, à l'aide d'un vertex forestier (axe des x) et des valeurs des MNS générés à partir des images capturées par le drone (axe des y).	32
<u>Figure 38</u> : Diagramme de dispersion illustrant la relation entre le DBH d'un arbre par quadrat, obtenu à partir d'inventaires de terrain (axe des x) et l'aire de sa couronne, obtenue via la mesure des orthomosaïques générées à partir des images capturées par le drone (axe des y).	33
<u>Figure 39</u> : Diagramme de dispersion des différences altimétriques entre trois points sélectionnés aléatoirement au sein de chaque quadrat (A, B et C), obtenues à partir des valeurs du MNT généré à partir de données LiDAR de 2021 (axe des x) et des valeurs des MNT générés à partir des images capturées par le drone (axe des y).	36
<u>Figure 40</u> : Diagramme de dispersion des différences altimétriques entre trois points sélectionnés aléatoirement au sein des trois quadrats de la typologie "zones de jardin" (A, B et C), obtenues à partir des valeurs du MNT généré à partir de données LiDAR de 2021 (axe des x) et des valeurs des MNT générés à partir des images capturées par le drone (axe des y).	37
<u>Figure 41</u> : Diagramme de dispersion des différences altimétriques entre trois points sélectionnés aléatoirement au sein des trois quadrats de la typologie "berges végétalisées" (A, B et C), obtenues à partir des valeurs du MNT généré à partir de données LiDAR de 2021 (axe des x) et des valeurs des MNT générés à partir des images capturées par le drone (axe des y).	37

TABLE DES TABLEAUX

<u>Tableau 1</u> :	Tableau comparatif des paramètres de vol sélectionnées entre l'approche minimaliste.	19
<u>Tableau 2</u> :	Tableau de recensement des espèces d'arbres identifiées dans le quadrat A, à partir d'un inventaire de terrain.	23
<u>Tableau 3</u> :	Tableau comparatif des pourcentages de recouvrement de chaque strate végétale obtenus à partir d'inventaires de terrain et d'observations des orthomosaïques et des MNS générés à partir des images capturées par le drone pour la typologie corridor - alignements d'arbres.	34
<u>Tableau 4</u> :	Tableau comparatif des pourcentages de recouvrement de chaque strate végétale obtenus à partir d'inventaires de terrain et d'observations des orthomosaïques et des MNS générés à partir des images capturées par le drone pour la typologie corridor - berges végétalisées.	34
<u>Tableau 5</u> :	Tableau comparatif des pourcentages de recouvrement de chaque strate végétale obtenus à partir d'inventaires de terrain et d'observations des orthomosaïques et des MNS générés à partir des images capturées par le drone pour la typologie corridor - parcs linéaires.	34
<u>Tableau 6</u> :	Tableau comparatif des pourcentages de recouvrement de chaque strate végétale obtenus à partir d'inventaires de terrain et d'observations des orthomosaïques et des MNS générés à partir des images capturées par le drone pour la typologie patch - zones boisées.	34
<u>Tableau 7</u> :	Tableau comparatif des pourcentages de recouvrement de chaque strate végétale obtenus à partir d'inventaires de terrain et d'observations des orthomosaïques et des MNS générés à partir des images capturées par le drone pour la typologie patch - zones de jardin.	35
<u>Tableau 8</u> :	Tableau comparatif des pourcentages de recouvrement de chaque strate végétale obtenus à partir d'inventaires de terrain et d'observations des orthomosaïques et des MNS générés à partir des images capturées par le drone pour la typologie patch - zones ouvertes.	35
<u>Tableau 9</u> :	Tableau comparatif des données de captures obtenues entre l'approche minimaliste et l'approche maximaliste pour le quadrat de la zone de jardin.	38
<u>Tableau 10</u> :	Tableau comparatif des données de captures obtenues entre l'approche minimaliste et l'approche maximaliste pour le quadrat de l'alignement d'arbres.	38
<u>Tableau 11</u> :	Tableau comparatif des données de captures obtenues entre l'approche minimaliste et l'approche maximaliste pour le quadrat du parc linéaire.	38
<u>Tableau 12</u> :	Tableau comparatif du total des données de captures obtenues entre l'approche minimaliste et l'approche maximaliste pour les trois quadrat observés.	39
<u>Tableau 13</u> :	Tableau comparatif entre l'approche minimaliste et l'approche maximaliste, pour la reconstitution 3D du quadrat de la zone de jardin.	40
<u>Tableau 14</u> :	Tableau comparatif entre l'approche minimaliste et l'approche maximaliste, pour la reconstitution 3D du quadrat de l'alignement d'arbres.	41
<u>Tableau 15</u> :	Tableau comparatif entre l'approche minimaliste et l'approche maximaliste, pour la reconstitution 3D du quadrat du parc linéaire.	43

1. INTRODUCTION

1.1. CONTEXTE

La proportion de territoire occupée par les villes ne cesse d'augmenter, tant en Europe que dans le reste du monde (Westphal, 2015). Dans son rapport sur les perspectives de l'urbanisation, édité en 2014, l'Organisation des Nations Unies estime que d'ici 2050, les zones urbaines accueilleront 2,5 milliard de personnes supplémentaires, soit 66% de la population mondiale. Cette proportion s'élève actuellement à 57% (Groupe de la Banque Mondiale, 2022).

Cette urbanisation rapide accentue les effets du changement climatique et le phénomène local d'îlots de chaleur, ce qui cause des effets néfastes sur la qualité de vie des citoyens (Anquetil, 2010). Ce phénomène démographique modifie l'occupation des sols et augmente les surfaces imperméabilisées au détriment des espaces naturels, ce qui entraîne également des conséquences environnementales (Aguejda, 2011). L'expansion des villes participe en effet à la fragmentation des structures paysagères ainsi qu'à la disparition d'espaces à fortes qualités écologiques, ce qui menace les écosystèmes et leur biodiversité (Aguejda, 2011).

Dans ce contexte, les espaces verts sont souvent présentés comme une solution pour atténuer les effets néfastes de l'urbanisation et pour améliorer la qualité de vie en ville (Song et al., 2020; Anquetil, 2010). Le terme "espace vert urbain" désigne "tous les systèmes naturels, semi-naturels et artificiels, présents à l'intérieur, autour et entre les zones urbaines de toutes les échelles spatiales" (Chang et al., 2014). Les différents services écosystémiques qu'ils procurent sont, entre autres, l'amélioration de la qualité de l'air, de l'eau et du sol, l'atténuation des îlots de chaleur urbains, la réduction du bruit, ainsi que la conservation de la biodiversité en fournissant des habitats pour les animaux sauvages en ville (Selmi et al., 2016; Nowak et al., 2018; Jim, 2004; Park et al., 2017; Solecki & Welch, 1995; Aronson et al., 2017). Les espaces verts urbains offrent également une série de bénéfices sociaux, car ils encouragent l'activité sportive, les interactions sociales et les activités de plein air (Tan et al., 2021; Zhang et al., 2022).

Cette végétation se présente sous diverses formes dans l'espace urbain. On y retrouve par exemple des parcs, des arbres de rue, des jardins privés, des jardins communautaires, des friches ou encore des toitures végétales et des murs végétalisés (Jin & Xiao, 2023). Les différences d'échelle, de fonction et de composition végétale entre les espaces verts urbains influencent les services écosystémiques qu'ils produisent. En effet, la nature et la quantité de ces services varient en fonction du contexte, du type et de la taille de l'espace vert urbain considéré (Song et al., 2020).

Cette diversité de fonctions et de bénéfices offerts par la présence de végétation en ville implique la nécessité de protéger et d'améliorer les espaces verts urbains existants, notamment à travers des suivis et des modes de gestion adéquats. Et ce tout en développant de nouvelles infrastructures vertes urbaines (Jin & Xiao, 2023; Shahtahmassebi et al., 2021). Pour ce faire, il convient d'acquérir une connaissance fine de ces espaces, notamment à travers des analyses de site. C'est donc ici que le rôle de l'architecte paysagiste intervient.

Le travail d'analyse nécessite d'examiner les interrelations qui s'opèrent entre les différentes parties qui constituent un tout (ici, le paysage) (Stahlschmidt et al., 2017). L'objectif est de comprendre le caractère, la structure et la fonction du site considéré, pour identifier les enjeux et les problématiques qui s'y opèrent, mais aussi pour évaluer son potentiel et les opportunités qu'il peut offrir. Ceci permet ensuite de prendre des décisions politiques, de planification ou de conception concernant l'état et la gestion future de l'aménagement à

venir, afin de maximiser les bénéfices qu'il peut offrir (Stahlschmidt et al., 2017). En d'autres mots, c'est "comprendre et percevoir ce qui existe, pour considérer ce qui pourrait exister" (Milligan, 2019).

Il existe de nombreuses façons d'entreprendre une analyse du paysage, selon l'objectif visé par celle-ci. Le choix des caractéristiques du site étudiées varie en fonction des intérêts du site et de l'intention derrière le projet (Milligan, 2019). Il est donc primordial d'identifier le but de l'aménagement projeté, pour définir de quelle manière l'analyse contextuelle va être abordée (Stahlschmidt et al., 2017).

Aujourd'hui, une variété d'outils permet d'analyser diverses fonctions et caractéristiques d'un paysage. En conséquence, les architectes paysagistes se tournent souvent vers des experts de domaines spécifiques pour sous-traiter l'analyse de leurs sites. Parallèlement, les progrès en télédétection par satellite fournissent aux paysagistes une abondance de données numérisées et d'orthophotoplans, facilement accessibles et utilisables (Milligan, 2019). La télédétection est définie par le Centre canadien de télédétection comme "la technique qui, par l'acquisition d'images, permet d'obtenir de l'information sur la surface de la Terre sans contact direct avec celle-ci." "La télédétection englobe tout le processus qui consiste à capter et à enregistrer l'énergie d'un rayonnement électromagnétique émis ou réfléchi, à traiter et à analyser l'information, pour ensuite mettre en application cette information." (Centre canadien de télédétection, 2007). Les architectes paysagistes sont ainsi souvent dépendants d'autres professionnels pour obtenir les données indispensables à leurs analyses de terrain.

Les deux méthodes d'analyse les plus couramment utilisées dans le domaine de l'Architecture de Paysage sont les suivantes :

- **Les relevés de terrains** : les relevés de terrain ont l'avantage de fournir des informations très précises et détaillées sur les espaces verts urbains (Shahtahmassebi et al., 2021). Toutefois, cette méthode est particulièrement longue, coûteuse, et ne permet pas d'inventorier simultanément des données à grande échelle (Pu & Landry, 2012).
- **L'observation d'orthophotoplans générés à partir d'images satellite, et autres données cartographiques facilement accessibles via des géoportails comme Walonmap pour la Wallonie** : les méthodes traditionnelles de télédétection, effectuées à l'aide de données satellites permettent de générer simultanément des données sur une vaste zone. (Pu & Landry, 2012). Néanmoins, leur résolution spatiale et temporelle s'avère souvent insuffisante pour analyser des sites à plus petite échelle, là où s'opèrent la majorité des projets d'architecture paysagère (Wavrek et al., 2023; Kullmann, 2018). Ainsi, l'utilisation d'images satellite est davantage efficace pour analyser la répartition globale des espaces verts au sein d'une ville, plutôt que pour l'analyse de parcs urbains individuels (Jin & Xiao, 2023).

Plus récemment, les sites de cartographie en ligne, comme Google Maps, proposent également aux utilisateurs une vision aérienne 3D, ainsi que la possibilité de se mouvoir virtuellement dans l'espace public à l'aide de Google Street Views. Néanmoins, cette vision 3D se limite uniquement à des vues inclinées, et les rendus, bien qu'intéressants pour une première compréhension globale d'un site, manquent de précision (Kullmann, 2018).

L'objectif principal qui guide cette étude est donc de proposer une nouvelle méthode d'analyse de paysage, qui offre à la fois une précision à l'échelle des espaces verts urbains, tout en étant économe en temps et en coûts.

La photogrammétrie par drone semble être une méthode efficace et une alternative intéressante pour répondre à cet objectif.

1.2. ÉTAT DE L'ART

Le drone, aussi appelé UAV (Unmanned Aerial Vehicle) désigne un engin sans équipage ni pilote, dont le pilotage est automatique ou contrôlé à distance depuis le sol, à l'aide d'une télécommande. Il est équipé de systèmes de géolocalisation par satellite, ainsi que d'un capteur, comme une caméra, qui lui permet de générer des images aériennes (Jacobs, 2023). Ces images peuvent ensuite être importées sur des logiciels informatiques, pour effectuer un traitement photogrammétrique.

La photogrammétrie est une opération qui permet de restituer géométriquement un objet en trois dimensions, sur base de plusieurs photos avec différents angles de vue (IGN Institut, 2021). L'ensemble des données spatiales recueillies peuvent ensuite être utilisées dans les applications de Système d'Informations Géographiques (SIG) (Agisoft, s.d.).

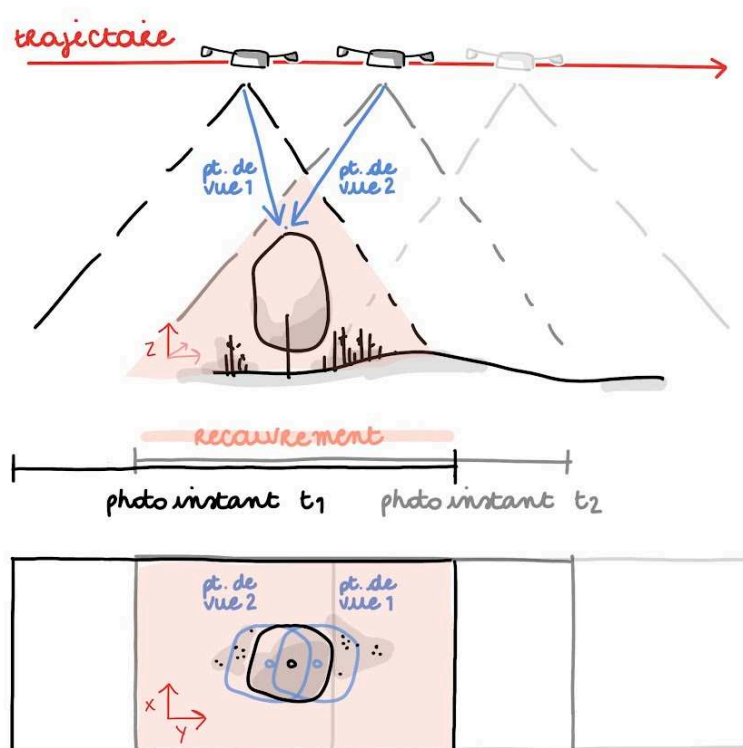


Figure 1 : La photogrammétrie, schéma explicatif. Production personnelle.

Dans le cadre de la photogrammétrie par drone, l'UAV capture plusieurs images aériennes lors de sa mission, en respectant un recouvrement spécifié dans les paramètres de vol. Ces photographies sont ensuite traitées par un logiciel de restitution, qui les aligne les unes aux autres sur base de points clés extraits sur chaque image individuelle (IGN Institut, 2021; Michez & Lejeune, 2020). Une mise en correspondance de ces photographies est ensuite effectuée pour identifier leurs points homologues, c'est-à-dire les points caractéristiques présents sur plusieurs images. Les positions relatives des images peuvent ainsi être déterminées, permettant de les assembler. (Egels, 2011; Michez & Lejeune, 2020) (Figure 1). Une fois les photos assemblées, les points concordants entre deux prises de vue forment le niveau 0 de l'axe vertical Z. Les points qui ne sont pas concordants sont ceux qui sont décalés verticalement par rapport à ce niveau de référence. Par trigonométrie, l'altitude de ces points (coordonnées Z) peut être calculée.

Grâce à la photogrammétrie, un nuage de points selon les 3 axes, précis et de haute résolution est ainsi généré, grâce à la mise en correspondance d'images bidimensionnelles (He et al., 2022; Cureton, 2017). Ce nuage de point peut ensuite servir d'ébauche pour la création d'un modèle 3D, qui donne la possibilité à l'architecte paysagiste de s'immerger au sein du site considéré, lui permettant de mesurer des élévations, des angles ou encore des distances (Cureton, 2017).

Le drone permet ainsi de collecter des données plus rapidement et à moindre coûts, comparativement aux inventaires de terrain, tout en fournissant des données plus précises et de meilleure résolution que la télédétection par satellite (Wavrek et al., 2023). Ceci en fait donc un outil plus adapté pour l'analyse de site à l'échelle des espaces verts urbains (Wavrek et al., 2023).

Pourtant, actuellement, la grande majorité des espaces analysés via la télédétection par drone concerne des sites relativement homogènes tels que les espaces naturels, forestiers ou encore agricoles (Michel & Lortic, 1992). L'intérêt de ces collectes de données vise à obtenir des informations sur la végétation présente dans ces zones, pour éventuellement en assurer la surveillance (Berni et al., 2008). Toutefois, peu d'études ont, à ce jour, exploré le potentiel du drone en milieu urbain (Wavrek et al., 2023). Cela s'explique car la ville est un milieu avec une structure davantage hétérogène, ce qui la rend plus délicate à cartographier (Suran et al., 2019).

Ainsi les études qui exploitent le potentiel du drone en milieu urbain se portent principalement sur des espaces verts homogènes tels que des forêts urbaines, des vastes parcs ou des vergers (Jin & Xiao, 2023). On observe une absence de recherches sur le potentiel du drone dans l'analyse de parcelles de végétation plus petites (Wavrek et al., 2023). Enfin, il semble important de souligner que, dans la plupart de ces études, les avantages de cette technologie pour l'architecture du paysage ne sont pas évoqués. Or, impliquer directement les paysagistes dans l'utilisation de ces nouvelles méthodes de cartographie permettrait sans doute de démocratiser davantage ces techniques, au sein de la profession.

2. OBJECTIF DE L'ÉTUDE

L'objectif principal de ce travail de fin d'études est d'évaluer le potentiel du drone, pour l'analyse paysagère de végétation urbaine à petite échelle, à travers le domaine de l'architecture de paysage.

Cette étude vise à évaluer la précision du drone à fournir des données quantitatives sur la structure et la composition de la végétation urbaine, et examine le potentiel du drone pour générer des modèles 3D de qualité grâce au traitement photogrammétrique des images capturées. Elle a pour but de vérifier les trois hypothèses suivantes :

1. La caractérisation des espaces verts urbains par drone permet de générer des données plus précises et plus actuelles que celles issues des cartographies accessibles en ligne, du Service Public de Wallonie.
2. La caractérisation des espaces verts urbains par drone permet de générer des données de qualité égale à celles obtenues par les inventaires de terrain, tout en réduisant le temps nécessaire par surface échantillonnée.
3. Le drone permet de générer des rendus 3D qui permettent une perception claire et précise de la structure paysagère inventoriée.

Ce travail s'articule autour de deux approches :

- une approche quantitative et objective visant à évaluer la précision des données sur la structure et la composition de la végétation obtenues par drone, à travers l'analyse de six indicateurs. Au cours de cette approche, 18 parcelles de 0.25 hectare, parmi six typologies de végétation urbaine, seront analysées.
- une approche qualitative, consistant à analyser plusieurs rendus 3D générés par le drone, afin de déterminer le jeu de paramètres le plus adéquat pour obtenir un rendu 3D précis et fidèle à la réalité. Les paramètres de vol minimalistes seront comparés à ceux d'une approche maximaliste, en observant la représentation 3D de trois structures paysagères d'une superficie comprise entre 0,25 hectare pour l'approche minimaliste et d'environ 2 à 2,5 hectares pour l'approche maximaliste.

Ce travail s'adresse directement aux paysagistes en utilisant des techniques et des logiciels accessibles et intuitifs, ne nécessitant pas de compétences supplémentaires au-delà de leur formation initiale. De plus, des tutoriels détaillés sur l'utilisation des différents logiciels employés dans cette étude sont fournis dans les Annexes 1 et 2.

3. MATÉRIEL ET MÉTHODE

Ce chapitre détaille le matériel et les méthodes utilisés dans le cadre de cette étude.

Il débute par une description succincte du périmètre d'étude choisi et de son contexte. La méthodologie de sélection des différentes typologies de végétation urbaine rencontrées sera ensuite détaillée, en décrivant les différents types d'espaces verts identifiés. Ce chapitre se poursuivra par la présentation des ressources informatiques utilisées, et de la méthodologie d'échantillonnage appliquée aux deux approches adoptées. La méthodologie de collecte des données de vol et du traitement des données obtenues sera ensuite expliquée. Le matériel et les méthodes employés pour la collecte des données photogrammétriques, et des données de référence auxquelles elles seront comparées seront également abordés. Enfin, la dernière section de ce chapitre expliquera le type de graphique choisi pour la présentation des résultats.

Ce chapitre fournit une vue d'ensemble claire et concise des méthodes utilisées pour garantir la précision et la reproductibilité des résultats de l'étude.

3.1. AIRE D'ÉTUDE

3.1.1. LOCALISATION

Les données ont été collectées dans l'environnement urbain de la Ville de Liège, située à l'Est de la Belgique. Liège est une ville francophone de Wallonie, qui accueille une population d'environ 195.000 habitants, sur une superficie de 69 km², soit une densité de 2.800 habitants/km² (Statbel, 2023). Elle est la deuxième ville la plus peuplée de Wallonie (Ville de Liège, 2023), et le chef-lieu de la province de Liège (Philippot, 2024).

3.1.2. CLIMAT

La Ville de Liège se situe à la jonction de deux zones bioclimatiques : la zone bioclimatique du Hesbino-Brabançon et de Sambre-et-Meuse et Condroz (SPW, 2018). Située dans l'hémisphère nord, son climat est qualifié de tempéré chaud, avec une température moyenne annuelle de 10,1°C et des précipitations annuelles importantes, qui s'élèvent à 886 mm (Climate Data, s.d.) (Figure 2).

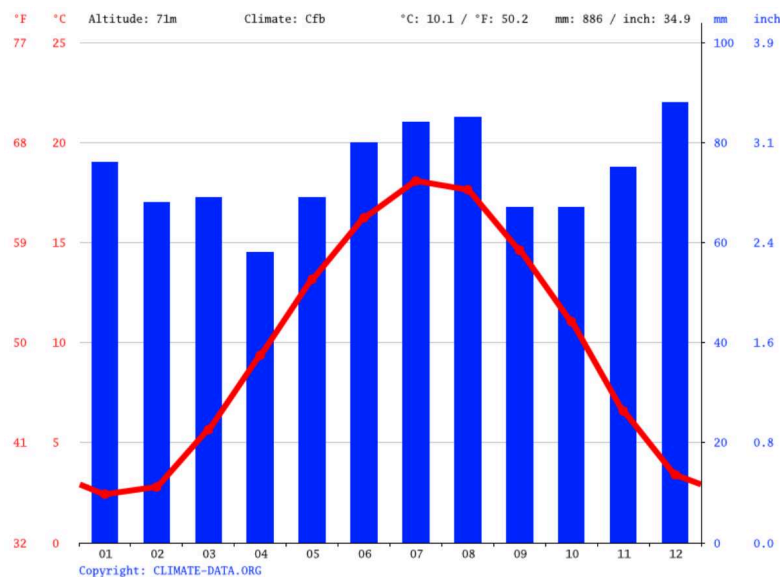


Figure 2 : Diagramme ombrothermique de la Ville de Liège. (Climate Data, s.d.)

3.1.3. CONTEXTE

La ville de Liège prend place sur le fond de vallée créé par les cours d'eau de la Meuse et de l'Ourthe. La présence de cette vallée confère à la ville une topographie contrastée, avec un fond de vallée relativement plat, confiné au sein de versants au relief escarpé. Cette topographie a intimement influencé l'occupation du sol et l'implantation du bâti, principalement localisée en fond de vallée et sur les plateaux, tandis que les zones au relief plus marqué accueillent la végétation boisée (Philippot, 2024).

À l'échelle du centre-ville, l'offre en espaces verts est principalement concentrée au sud, résultant d'importants projets d'aménagement menés dans les quartiers bourgeois au cours du 19^{ème} siècle. D'autres parcs ont ensuite été créés au cours du 20^{ème} siècle à la suite de grandes opérations d'urbanisation (Département de l'Urbanisme de la Ville de Liège, 2023; Philippot, 2024) (Figure 3).

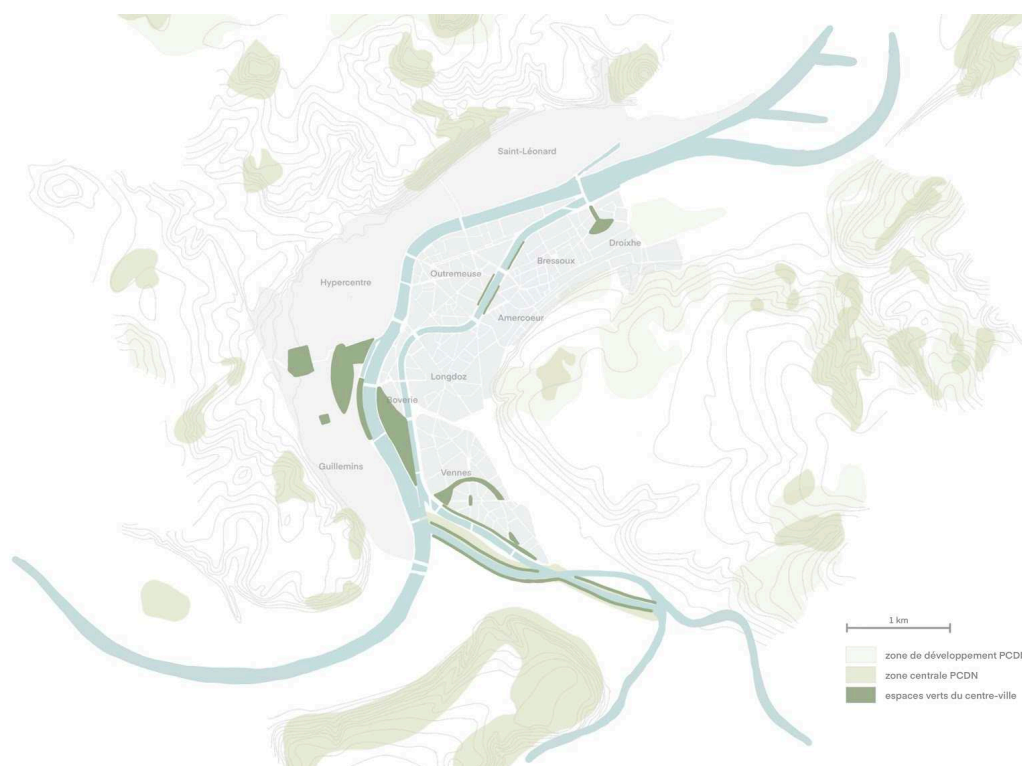


Figure 3 : Carte de localisation des espaces verts du centre-ville de Liège. Production personnelle.

Ainsi, les arbres présents dans les parcs, les jardins privés et les alignements de rues forment la majorité de la biomasse du centre-ville de Liège (Département de l'Urbanisme de la Ville de Liège, 2023) (Figure 3).

3.2. PÉRIMÈTRE D'ÉTUDE

Le périmètre d'étude sélectionné pour ce travail se situe au sud de la ville, où se concentrent la plupart des espaces verts du centre-ville (Figure 3). Pour limiter la taille de la zone d'étude, une surface de 150 hectares a été définie, permettant de réaliser tous les relevés en une journée afin de minimiser les variations dues aux conditions de lumière et météorologiques changeantes (Wavrek et al., 2023).

Le périmètre d'étude sélectionné s'étend de part et d'autre d'un tronçon de la Meuse et de sa Dérivation, quelques mètres après sa confluence avec l'Ourthe, de manière à englober à la fois le Parc de la Boverie, mais également le Parc d'Avroy, qui forment les deux plus grands parcs du centre-ville de Liège (Figure 4).

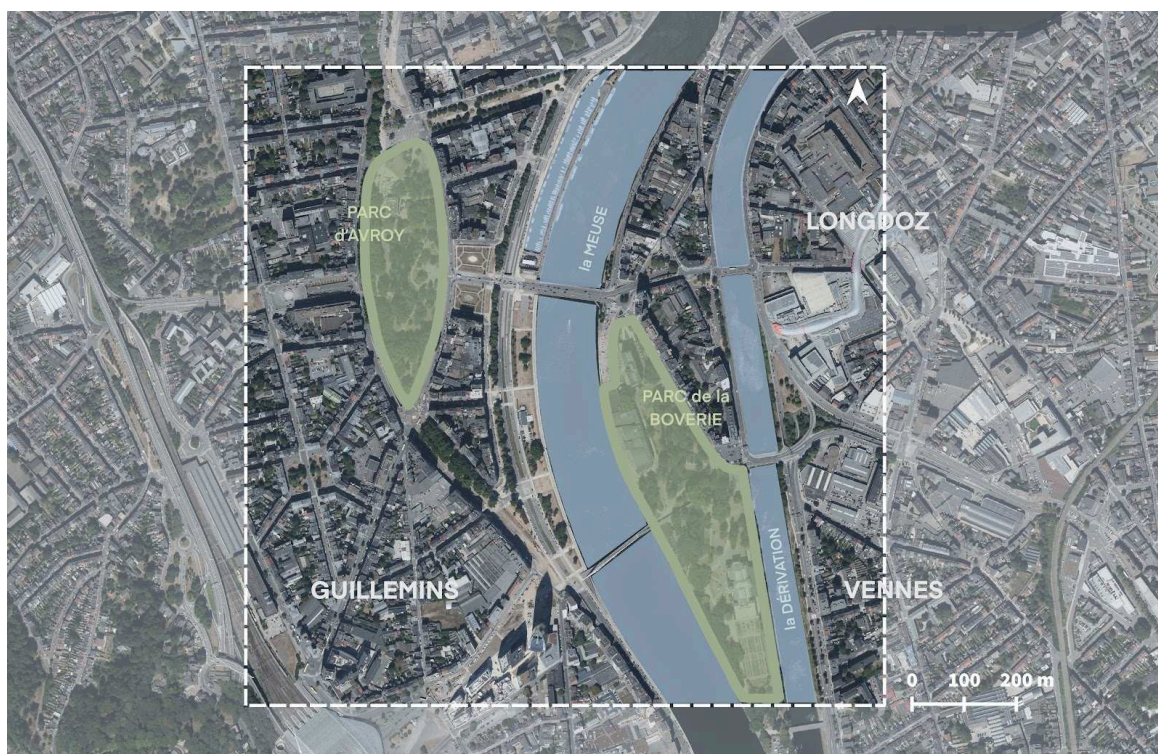


Figure 4 : Carte de localisation du périmètre d'étude. Production personnelle.

3.2.1. TYPOLOGIES VÉGÉTALES

L'observation de la végétation urbaine à partir d'orthophotoplans, de la carte d'occupation du sol en Wallonie, de la carte du masque forestier et des arpentages de terrain a permis de classer les espaces verts publics présents au sein du périmètre d'étude à travers six typologies différentes.

3.2.1.1. MATRICE-PATCH-CORRIDOR

Les espaces verts publics ont tout d'abord été traduits sous forme de taches et de corridors, conformément au concept de matrice-patch-corridor en écologie du paysage. Ce modèle, simple et facilement répliquable, constitue une aide efficace pour l'analyse et la comparaison de paysages hétérogènes (Forman, 1995).

Les trois composantes de ce concept sont définies comme telles :

- **la matrice** : la matrice est l'élément dominant d'un paysage. Il est l'arrière-plan duquel émergent les taches et les corridors (Forman, 1995). Dans le périmètre défini pour cette étude, le cadre bâti, regroupant les habitations et les infrastructures routières, constitue la matrice du paysage étudié (Figure 5, Annexe 4).
- **les taches (patch)** : les taches sont des éléments dont l'occupation du sol se distingue de la matrice. Elles peuvent varier de grandes à petites, allongées à rondes et alambiquées à lisses (Forman, 1995). En s'appuyant sur la carte d'occupation du sol en Wallonie WALOUS 2018, les espaces publics occupés par un couvert herbacé toute l'année définissent les taches de ce paysage (Géoportail de la Wallonie, s.d.-c) (Figure 5, Annexe 4).
- **les corridors (corridor)** : les corridors sont des éléments linéaires du paysage qui assurent la connectivité entre les habitats (les taches), au sein de l'environnement plutôt défavorable qu'est la matrice (Bergès et al., 2010). Leur forme peut varier de sinueuse à droite et de large à étroite, avec une connectivité pouvant être soit élevée, soit très faible (Forman, 1995). Les berges végétalisées de la Meuse et les alignements d'arbres de rues, qui apparaissent sur la carte d'occupation du sol en Wallonie, constituent les corridors du paysage étudié (Figure 5, Annexe 4).



Figure 5 : Traduction des espaces verts publics présents au sein du périmètre d'étude sous forme de taches et de corridors, conformément au concept de matrice-patch-corridor en écologie du paysage. Production personnelle.

Pour limiter le nombre de taches et de corridors pris en compte, seules les taches de plus de 0,25 hectare et les corridors de plus de 200 mètres de long et de plus de 10 mètres de large ont été considérés (Figure 12).

3.2.1.2. IDENTIFICATION DE SIX TYPOLOGIES

À travers les taches et les corridors considérés, six typologies de végétation ont été identifiées (Figure 12).

Les corridors se divisent en trois typologies différentes, identifiées d'après l'observation d'orthophotoplans et des arpentages de terrain :

- **les alignements d'arbres de rue** : les alignements d'arbres présents au sein du périmètre d'étude suivent le tracé des grands boulevards. Présents depuis plus de 50 ans, ils sont majoritairement composés d'arbres âgés de taille imposante, qui côtoient parfois des individus beaucoup plus jeunes, plantés dans le cadre du réaménagement des quais de Meuse en 2015 (Ville de Liège, 2015). Les arbres y sont plantés en ligne, avec des espacements réguliers, et sont souvent accompagnés d'une bande enherbée. La richesse en espèces de cette typologie est peu élevée, car les arbres qui composent les alignements sont généralement tous de la même espèce (Figure 6).
- **les berges végétalisées** : les berges végétalisées de la Meuse sont caractérisées par un relief plus contrasté que celui des autres typologies. Leur végétation est composée d'arbres disposés aléatoirement sur une pelouse, et d'une strate herbacée haute qui se développe au sommet des talus et au pied des arbres. La strate arborée comprend des individus d'espèces et d'âges variés, les plus anciens sont présents depuis plus de 30 ans (Figure 7).
- **les parcs linéaires** : les parcs linéaires se distinguent des alignements d'arbres de rues par leur fonction, qui pourrait être davantage associée à celle d'un parc. Ils intègrent à la fois des alignements d'arbres et du mobilier urbain, et sont traversés par des cheminements piétons. Ils incluent généralement un double alignement d'arbres, contenu au sein d'une rue, accompagné d'une strate herbacée basse. Similairement

à la typologie précédente, la disposition de la strate arborée est régulière et le choix des essences est peu diversifié. Les arbres, de taille imposante, sont majoritairement âgés de plus de 50 ans, avec quelques jeunes plants qui les complètent (Figure 8).



Figure 6 : *Typologie alignement d'arbres de rue* (Photographie personnelle)



Figure 7 : *Typologie berge végétalisée* (Photographie personnelle)

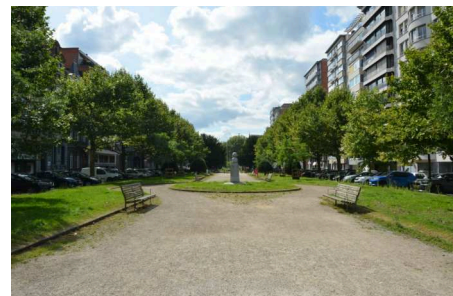


Figure 8 : *Typologie parc linéaire* (Photographie personnelle)

Les taches, qui regroupent les parcs urbains d'Avroy et de la Boverie, se divisent en trois typologies différentes. Leur superposition avec la carte du masque forestier, qui reprend les étendues de forêt de plus de 20 mètres de largeur et de 50 ares de surface, permet de différencier les zones ouvertes des zones boisées (Géoportail de la Wallonie, s.d.-a) (Annexe 5). Tandis que les observations d'orthophotoplans et les arpentages de terrain permettent d'identifier un troisième type d'espace vert urbain :

- **les zones boisées** : les zones boisées sont caractérisées par un couvert fermé qui accueille une grande diversité d'espèces. La majorité des arbres y sont anciens, de grande dimension et d'espèces diversifiées, et sont disposés aléatoirement au sein d'une strate herbacée basse. La taille et la richesse spécifique des arbres de cette typologie s'expliquent en partie par l'utilisation passée du Parc de la Boverie comme un jardin d'acclimatation, aménagé en 1865 par la Société royale d'horticulture et d'acclimatation (Joris & Marchesani, 2009) (Figure 9).
- **les zones ouvertes** : parfois accompagnées de plans d'eau, les zones ouvertes des parcs d'Avroy et de la Boverie sont caractérisées par la présence d'arbres isolés, disposés aléatoirement sur une étendue engazonnée. Les quelques arbres qu'elles renferment sont généralement de grande dimension et d'espèces diversifiées et exotiques. La taille et la richesse spécifique des arbres de cette typologie s'expliquent également par l'aménagement d'un jardin d'acclimatation dans le Parc de la Boverie (Joris & Marchesani, 2009) (Figure 10).
- **les zones de jardin** : contrairement aux typologies précédentes, les zones de jardin n'intègrent généralement pas de strate arborée. En revanche, les strates herbacées et arbustives y sont davantage développées. L'implantation de la végétation suit des tracés symétriques et géométriques, typiques des jardins à la française (Nys, s.d.). Ce type d'espace vert urbain accueille divers éléments artificiels, tels que des jets d'eau, des structures métalliques pour soutenir des plantes grimpantes, une pergola, des statues, etc. Ces espaces sont également consacrés à la culture d'essences végétales, avec la rose comme espèce dominante de cette typologie (Figure 11).

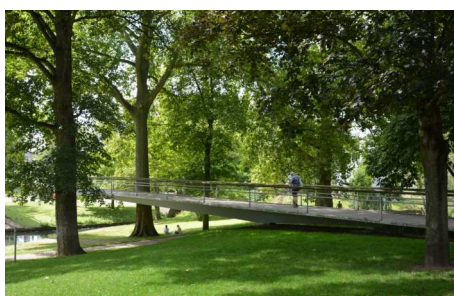


Figure 9 : *Typologie zone boisée.* Photographie personnelle.



Figure 10 : *Typologie zone ouverte.* Photographie personnelle



Figure 11 : *Typologie zone de jardin.* Photographie personnelle.



Figure 12 : Détermination des six typologies de végétation urbaine : schéma synthétique. Production personnelle.

3.3. RESSOURCES INFORMATIQUES

Le système d'information géographique QGIS (QGIS Desktop ; v.3.16.12) a permis de définir aléatoirement les quadrats d'observation en fonction de critères précis, assurant une couverture représentative des différentes typologies de végétation étudiées. Ce logiciel a également été utilisé pour l'extraction de données cartographiques.

La programmation des plans de vols par drone a été mise en place par le service Dronelink (Dronelink LLC. ; v.4.9.2). Ce logiciel a permis de planifier précisément les trajectoires de vol, en tenant compte des paramètres nécessaires pour obtenir une couverture adéquate des zones d'étude.

Les images capturées par le drone ont ensuite été traitées par le logiciel Agisoft Metashape (Agisoft Metashape Professional ; 64 bit). Metashape permet le traitement photogrammétrique d'images numériques pour générer des données tridimensionnelles utilisables dans des logiciels SIG. Dans le cadre de ce mémoire, cette application est utilisée pour générer des Modèles Numériques de Surface (MNS), des Modèles Numériques de Terrain (MNT), des orthomosaïques et des modèles 3D, à partir d'images capturées par le drone.

Enfin, le traitement statistique a été réalisé à l'aide de Microsoft Excel (Microsoft Excel, v.2406). Les données obtenues pour les différents indicateurs ont été organisées, analysées et visualisées à l'aide de cet outil, facilitant ainsi l'interprétation des résultats.

3.4. DESIGN D'ÉCHANTILLONNAGE

3.4.1. APPROCHE QUANTITATIVE

Pour sélectionner les quadrats d'observation de l'approche quantitative, une grille d'espacement horizontal et vertical de 50 mètres a été générée sur QGIS. Seuls les quadrats définis par cette grille, dont au moins 50 % de la superficie totale couvraient l'une des six typologies considérées, ont été pris en compte. Une sélection aléatoire de trois quadrats d'observation par typologie de végétation a ensuite été effectuée, aboutissant à un total de 18 quadrats d'observation de 0,25 hectare chacun (Figure 13, Annexe 3).

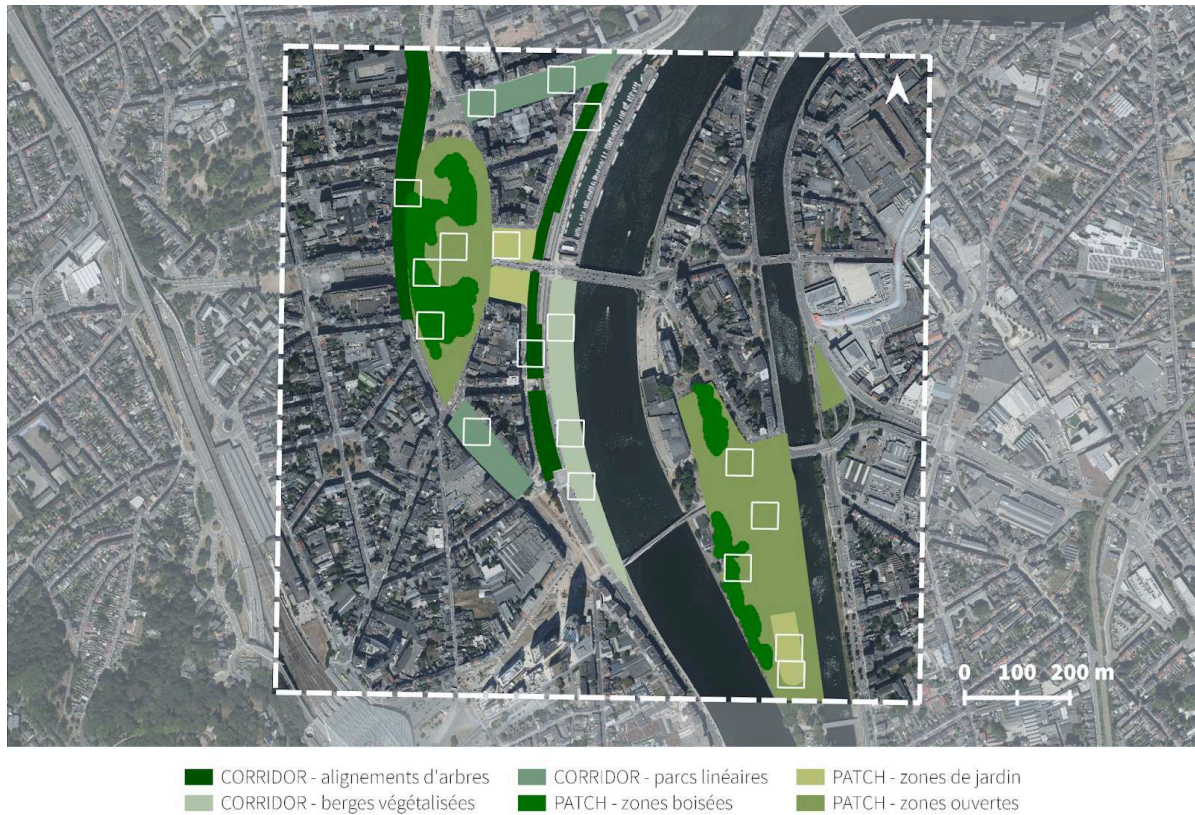


Figure 13 : Carte de localisation des 18 quadrats d'observation aléatoirement sélectionnés, parmi les six typologies de végétation urbaine identifiées. Production personnelle.

Le choix d'une superficie de 0,25 hectare permet d'avoir des sites suffisamment petits pour être répliqués de manière significative, tout en étant assez grands pour être représentatifs de l'ensemble de la structure paysagère qu'ils incarnent (Clark & Clark, 2000; Zolkos et al., 2013).

3.4.2. APPROCHE QUALITATIVE

La deuxième approche de ce mémoire se focalise sur trois des quadrats préalablement sélectionnés aléatoirement lors de l'approche quantitative (Figure 14). Le choix de ces trois quadrats est lié à leur pourcentage de couvert arboré. Les unités d'observations sélectionnées ont un pourcentage de couvert arboré équivalent à 75%, 25% et 0% de leur superficie totale. Il s'agit respectivement du quadrat A de la typologie "corridor - alignements d'arbres de rues", du quadrat I de la typologie "corridor - parcs linéaires" et du quadrat N de la typologie "patch - zones de jardin". La superficie de ces unités d'observation sera étendue de 0,25 hectare à environ 2,5 hectares, afin d'évaluer l'impact de la taille des quadrats sur la qualité de la reconstitution 3D.

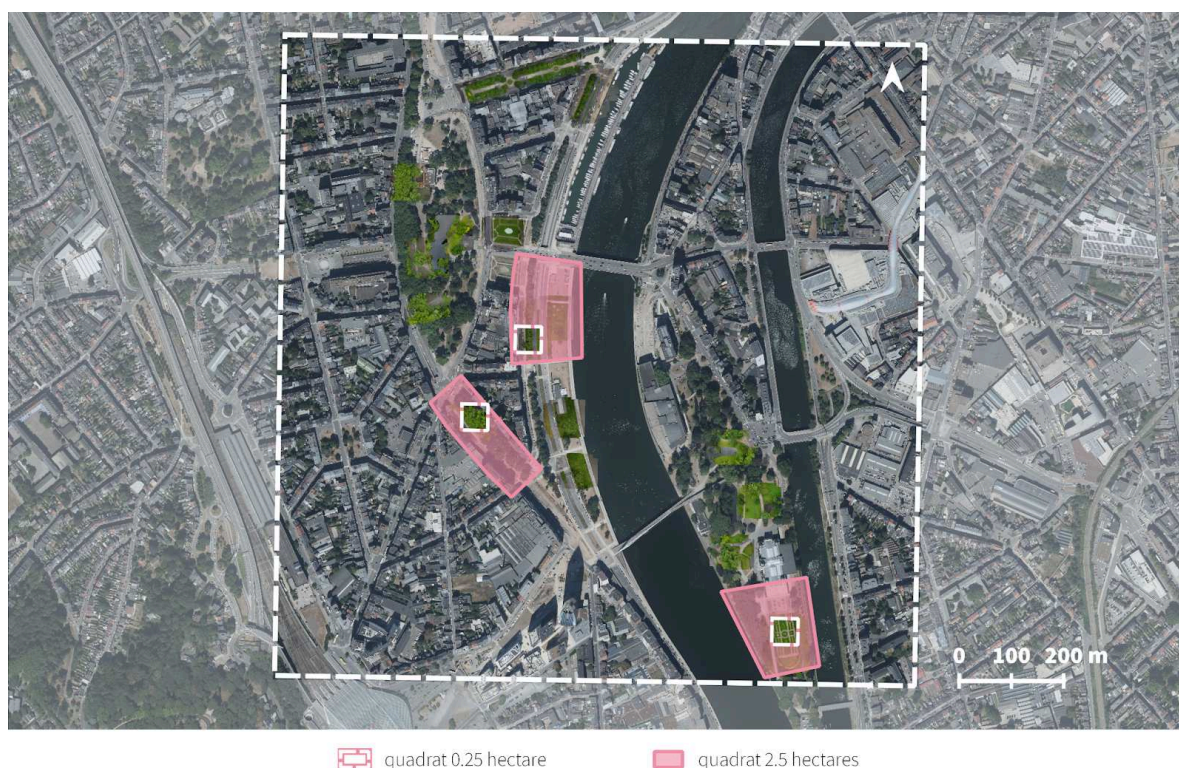


Figure 14 : Carte de localisation des 3 quadrats d'observation sélectionnés pour l'approche qualitative d'une superficie de 0,25 hectare, étendue à 2 ou 2,5 hectares pour la méthode maximaliste. Production personnelle.

3.5. SÉLECTION DES INDICATEURS

3.5.1. APPROCHE QUANTITATIVE

Les 18 quadrats, aléatoirement sélectionnés parmi les six typologies de végétation urbaine identifiées, sont analysés à travers six indicateurs, inspirés de la méthode de l'Indice de Biodiversité Potentielle (IBP) (Larrieu & Gonin, 2008). Initialement conçue pour les peuplements forestiers, elle constitue une méthode simple, rapide et pertinente pour évaluer la biodiversité potentielle d'un site à travers un ensemble de dix facteurs :

- richesse en essences forestières autochtones,
- structure verticale de la végétation,
- bois mort sur pied de "grosse" circonférence,
- bois mort au sol de "grosse" circonférence,
- très gros bois vivants,
- arbres vivants porteurs de microhabitats,
- présence de milieux ouverts,
- ancienneté de l'état boisé,
- présence d'habitats aquatiques,
- présence de milieux rocheux (Larrieu & Gonin, 2008).

Les indicateurs définis pour ce mémoire sont inspirés de cette méthode, mais ont été modifiés pour être applicables et adaptés au milieu urbain, tout en étant pertinents pour la collecte de données à l'aide d'un drone. Les indicateurs qui en résultent sont les suivants :

3.5.1.1. NOMBRE D'ARBRES

Cet indicateur vise à déterminer la précision du drone pour recenser l'ensemble des arbres présents au sein du quadrat analysé. Un arbre était pris en compte uniquement si son tronc se situait à l'intérieur du quadrat.

3.5.1.2. RICHESSE EN ESPÈCES

L'indicateur "richesse en espèce" permet d'évaluer si le drone est un outil efficace pour estimer la diversité spécifique des quadrats considérés. Cet indicateur recense le nombre d'espèces différentes au sein de chaque quadrat. Toute espèce a été comptabilisée dès lors qu'un individu était présent.

3.5.1.3. STRUCTURE VERTICALE

Cet indicateur évalue la précision des données fournies par le drone pour déterminer la structure verticale des quadrats analysés, à travers le recensement des hauteurs des arbres qui les composent.

3.5.1.4. AIRE DE LA COURONNE

L'indicateur "aire de la couronne" analyse la capacité du drone à fournir des données d'aire de couronne d'arbres proches de la réalité.

3.5.1.5. RECOUVREMENT VÉGÉTAL

Cet indicateur évalue la capacité du drone à déterminer le pourcentage de recouvrement occupé par les différentes strates de végétation au sein de chacun des quadrats sélectionnés. Les strates considérées sont les suivantes :

- **strate herbacée basse** : espace couvert par de la végétation herbacée ne dépassant pas 20 cm de hauteur.
- **strate herbacée haute** : espace couvert par de la végétation herbacée d'une hauteur minimale de 20 cm.
- **strate arbustive** : espace couvert par des individus ligneux n'atteignant pas 7 mètres de hauteur à l'âge adulte (Becker & Picard, 1982).
- **strate arborée** : espace couvert par des individus ligneux, comprenant un tronc et une cime, pouvant atteindre plus de 7 mètres de hauteur à l'âge adulte (Becker & Picard, 1982).

3.5.1.6. TOPOGRAPHIE

Cet indicateur évalue l'exactitude des données topographiques extraites du traitement photogrammétrique des images capturées avec le drone.

3.5.2. APPROCHE QUALITATIVE

L'approche qualitative repose sur une méthode de recherche axée sur l'observation et la comparaison des reconstructions 3D obtenues avec des paramétrages minimalistes et maximalistes. Cette approche ne nécessite pas de définir des indicateurs précis, mais vise à évaluer les reconstruction 3D en termes d'esthétisme, de détails et de précision des données géométriques. Elle se présente sous la forme d'un tableau comparatif.

Cette approche compare également les données de capture entre les vols réalisés avec un paramétrage minimaliste et maximaliste, incluant :

- le temps de vol
- le nombre d'images capturées
- le nombre d'images alignées
- le nombre de points homologues
- le nombre des points constituant le nuage de points

- le nombre de facettes triangulaires composant le maillage 3D
- la superficie totale de la surface inventoriée.

3.6. COLLECTES DES DONNÉES DE DRONE

Le modèle d'UAV utilisé dans le cadre de ce mémoire est un DJI Mini 2. Ce type de drone est équipé d'une caméra RGB couvrant un angle de 83 degrés et de définition Full HD (1080p) et de trois systèmes de positionnement par satellite (GPS, GLONASS et Galileo). Il a l'avantage d'être de petite taille (159×203×56 mm), léger (249 gr.) et relativement simple d'utilisation. Son prix s'élève à environ 500 €, ce qui reste plutôt abordable.

3.6.1. RÈGLEMENTS ET CONTRAINTES APPLIQUÉES AUX VOLS

Plusieurs conditions législatives et environnementales s'appliquent lors du processus de collecte de données par drone. Il est important de prendre en compte ces conditions afin de prévenir tout dommage à l'appareil et d'assurer le bon déroulement des opérations en toute sécurité.

3.6.1.1. CONDITIONS LÉGISLATIVES

Voler en milieu urbain nécessite de s'informer sur les zones géographiques UAV afin de respecter les conditions législatives qui s'y appliquent. En Belgique, il existe six GéoZones liées aux aéroports civils, qui requièrent une autorisation de vol. Celles-ci sont situées autour des aéroports d'Anvers, Bruxelles, Charleroi, Liège, d'Ostende, et de Courtrai (Skeyes, s.d.-b). Ces GéoZones, hormis celle de Courtrai, sont divisées en trois sous-zones, appelées "espace aérien Very Low Level" (VLL) :

- **VLL0** : espace situé au-dessus et à proximité des pistes
- **VLL1** : espace situé au-dessus et près de l'aéroport
- **VLL2** : espace situé plus loin de l'aéroport (Skeyes, s.d.-b)

Le périmètre d'étude sélectionné se situe dans une Géozone VLL2 de la Ville de Liège (Skeyes et FPS mobility and transport beglian civil aviation authority, s.d.). Pour pouvoir voler dans cette zone, il est nécessaire de soumettre une demande d'autorisation de vol à Skeyes, l'entreprise publique belge responsable du contrôle du trafic aérien (Skeyes, s.d.-a). Cette demande doit être introduite au moins trois heures avant le décollage, avec une confirmation automatique reçue trois heures avant le début de l'opération (Skeyes, s.d.-b).

La hauteur de vol autorisée au sein de cette zone est limitée à 150 pieds au-dessus du niveau du sol, soit 45,72 mètres (Skeyes, s.d.-b).

3.6.1.2. CONDITIONS MÉTÉOROLOGIQUES

Le bon déroulé des opérations est également dépendant des conditions météorologiques. En effet, le drone ne résiste pas à la pluie, ni aux vents excédant les 28 km/h. Il est donc essentiel de consulter les prévisions météorologiques les jours précédant l'opération et de les vérifier à nouveau le jour du vol.

3.6.1.3. CONTRAINTES TECHNIQUES

Des contraintes techniques s'appliquent également au drone, notamment une autonomie de batterie limitée à environ 20 minutes de vol. Il est donc crucial de prendre en compte ce paramètre lors de l'élaboration des plans de vol afin d'essayer, dans la mesure du possible, ne pas dépasser cette durée maximale. Si nécessaire, la mission peut toutefois être mise en pause pour permettre un changement de batterie.

3.6.2. PLANS DE VOL

Les plans de vol et les différents paramètres qui les caractérisent sont définis à l'avance et générés par l'application Dronelink (Dronelink LLC. ; v.4.9.2). Les étapes à suivre pour créer un plan de vol automatisé avec cette application sont détaillées sous forme de tutoriel dans l'Annexe 2.

Le choix des paramètres de vol influence la qualité de la reconstruction photogrammétrique :

- **recouvrement d'image** : le recouvrement d'image se réfère à la superposition de deux ou plusieurs images prises à des moments et sous des angles de vues différents. On distingue le recouvrement latéral du recouvrement longitudinal. Plus le recouvrement est important, plus l'assemblage des images lors du traitement photogrammétrique sera précis (Remondino et al., 2006) (Figure 15).

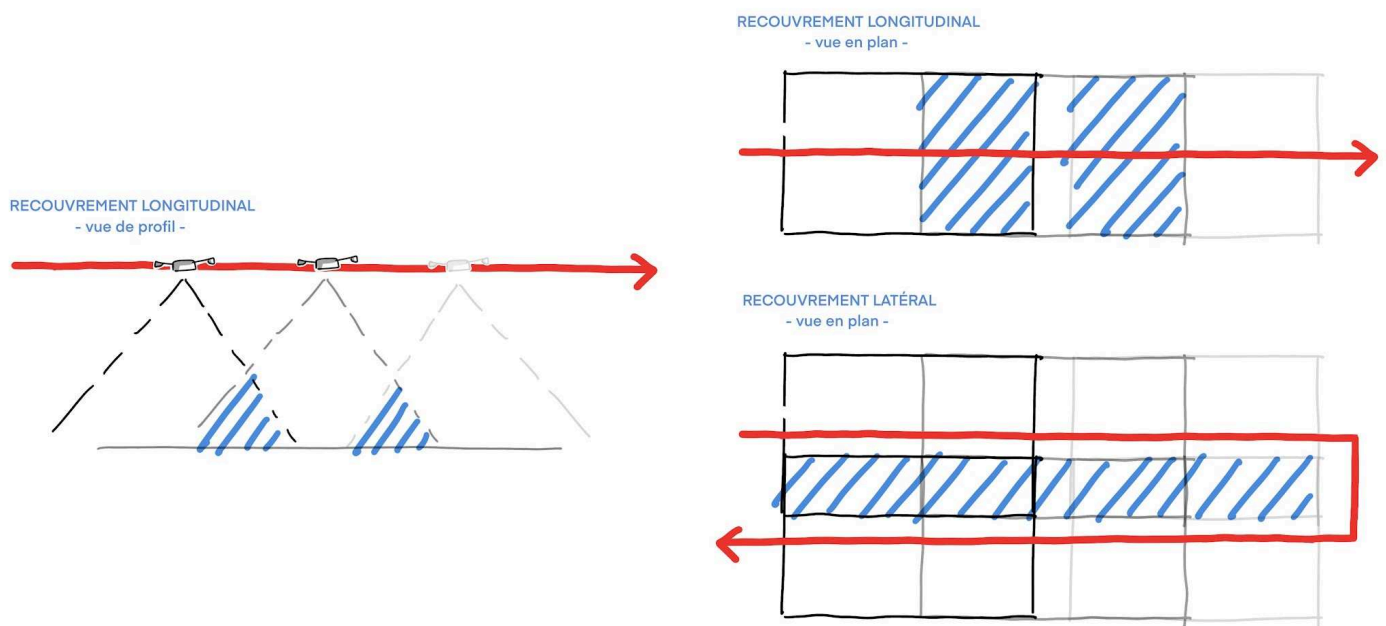


Figure 15 : Le recouvrement d'images, schéma explicatif. Production personnelle.

- **trajectoire de vol** : la trajectoire de vol est le chemin emprunté par le drone lors de son opération. Dans le cas de cette étude, cette trajectoire a été automatisée par l'application Dronelink. Il existe trois type de trajectoire :
 - o **la trajectoire "tondeuse" simple** : trajectoire qui capture systématiquement la zone d'intérêt en suivant des lignes parallèles, assurant ainsi une couverture complète du site étudié (de Lame, 2022; Eisenbeiß, 2009) (Figure 16).
 - o **la trajectoire "tondeuse" double** : méthode identique à la précédente, mais qui réalise une trajectoire supplémentaire, perpendiculaire à la première. Le modèle de trajectoire créé prend ainsi la forme d'une grille, ce qui augmente le nombre d'images disponibles et améliore ainsi la qualité de la reconstruction photogrammétrique (de Lame, 2022; Eisenbeiß, 2009) (Figure 16).
 - o **la trajectoire circulaire** : mode de trajectoire destiné aux modèles 3D, où les images sont prises sous différents angles autour d'un objet, défini comme le centre d'un cercle (de Lame, 2022) (Figure 16).

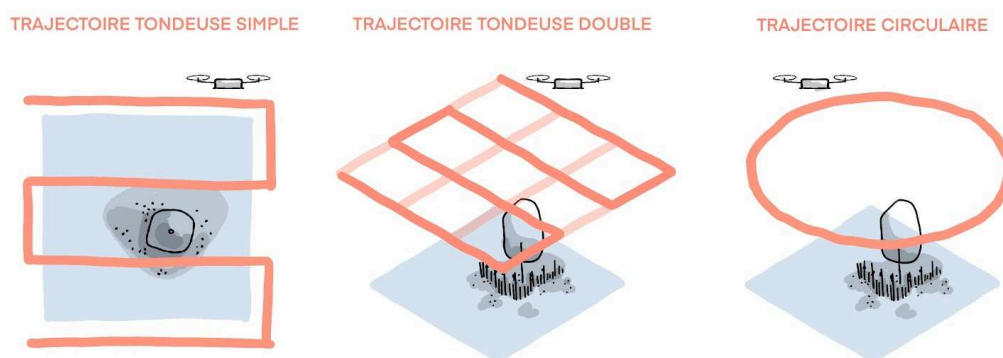


Figure 16 : Les différents types de trajectoire de vol par drone, schéma explicatif. Production personnelle.

- **angle de la caméra** : le choix de l'orientation de la caméra est un paramètre essentiel à définir en fonction du type de reconstruction photogrammétrique souhaité. Deux options sont possibles:
 - o **l'image nadir** : où la caméra est orientée perpendiculairement au sol. Cette prise d'images est adaptée pour les surfaces planes et pour la génération de cartographies, comme des orthomosaïques ou des Modèles Numériques de Surface (de Lame, 2022) (Figure 17).
 - o **l'image oblique** : où la caméra n'est pas orientée perpendiculairement au sol. Cette méthode est la plus appropriée pour les reconstructions 3D, car elle permet d'obtenir des points de vue sur des surfaces verticales, invisibles sur une image nadir (de Lame, 2022) (Figure 17).

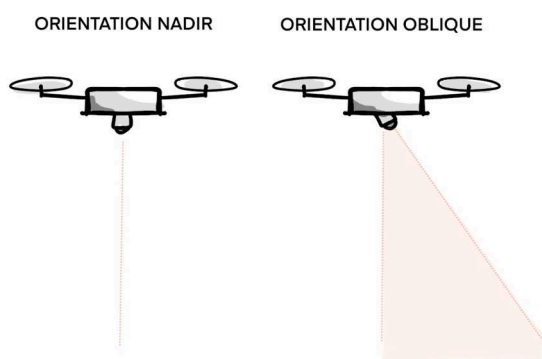


Figure 17 : Orientations nadir et oblique, schéma explicatif. Production personnelle.

- **superficie** : Lors de relevés photogrammétriques, il peut être intéressant de prévoir un tampon autour de la zone d'intérêt pour limiter les effets de bordure. En effet, les extrémités de la zone survolée présentent souvent des défauts de reconstruction en raison du recouvrement d'image inévitablement plus faible à ces endroits (Jacobs, 2023). Ainsi, plus la zone tampon définie est étendue, plus la reconstruction aux extrémités des quadrats sera précise.
- **altitude de vol** : Le choix de l'altitude de vol dépend à la fois de la législation en vigueur dans la zone de vol, de la hauteur des éléments présents sur le site, pour éviter la collision du drone avec des arbres ou des bâtiments, et de la finalité d'utilisation des images capturées. En effet, plus la hauteur de vol est basse, plus la résolution des images sera élevée. Cependant, une altitude plus élevée permet de couvrir une plus grande surface et peut faciliter la capture de grandes structures dans leur ensemble.

3.6.2.1. APPROCHE QUANTITATIVE

Les paramètres de vol définis pour l'approche quantitative sont les suivants :

- **recouvrement d'image** : Les recouvrements d'image longitudinal et latéral ont été définis à 80%. Cela signifie que chaque image chevauche 80% de l'image précédente, garantissant ainsi que chaque point au sol est capturé dans au moins deux images différentes.
- **trajectoire de vol** : Le type de trajectoire adopté est celui de la trajectoire tondeuse simple, pour assurer une couverture complète du site étudié tout en minimisant le temps de vol et le nombre d'images capturées.
- **angle de la caméra** : L'angle de la caméra a été réglé en orientation nadir, ce qui est optimal pour la reconstruction photogrammétrique de modèles planes.
- **superficie** : Aucune zone tampon n'a été définie pour cette approche. La superficie de vol était donc équivalente à la surface de chaque quadrat, soit 0,25 hectare.
- **altitude de vol** : L'altitude de vol a été déterminée par la législation en vigueur dans la zone étudiée et était fixée à 40 mètres.

L'ensemble des 18 quadrats a été recensé à travers un total de 6 vols distincts, avec une durée de vol cumulée de 45 minutes (Annexe 6).

3.6.2.2. APPROCHE QUALITATIVE

L'approche qualitative compare deux sélections de paramètres de vol (Tableau 1).

Une approche minimaliste, dont les paramètres, spécifiés ci-dessous, ont été réglés de manière à minimiser les temps de vol et les images capturées :

- **recouvrement d'image** : Les recouvrements d'image longitudinal et latéral ont été définis à 80%.
- **trajectoire de vol** : Le type de trajectoire adopté est celui de la trajectoire tondeuse simple, pour assurer une couverture complète du site étudié tout en minimisant le temps de vol et le nombre d'images capturées.
- **angle de la caméra** : L'angle de la caméra a été réglé en orientation nadir.
- **superficie** : Aucune zone tampon n'a été définie pour cette approche. La superficie de vol était donc équivalente à la surface de chaque quadrat, soit 0,25 hectare.
- **altitude de vol** : L'altitude de vol a été déterminée par la législation en vigueur dans la zone étudiée et était fixée à 40 mètres.

Et une approche maximaliste, dont les paramètres, spécifiés ci-dessous, ont été réglés de manière à maximiser la qualité de la reconstruction 3D :

- **recouvrement d'image** : Les recouvrements d'image longitudinal et latéral ont été définis à 80%.
- **trajectoire de vol** : Le type de trajectoire adopté est celui de la trajectoire tondeuse double, ce qui augmente le nombre d'images disponibles par rapport à la trajectoire tondeuse simple et améliore ainsi la qualité de la reconstruction photogrammétrique.
- **angle de la caméra** : L'angle de la caméra a été réglé en orientation oblique, plus appropriée pour les reconstructions 3D. La caméra était inclinée de 75 degrés.
- **superficie** : La superficie de vol variait entre 2 et 2,5 hectares, ce qui représente presque dix fois la superficie du quadrat initial. Avec une zone de tampon allant de 10 à 150 mètres.
- **altitude de vol** : L'altitude de vol a été déterminée par la législation en vigueur dans la zone étudiée et était fixée à 45 mètres.

Tableau 1 : Tableau comparatif des paramètres de vol sélectionnés entre l'approche minimaliste (colonne de gauche) et l'approche maximaliste (colonne de droite). Production personnelle.

PARAMÈTRES	APPROCHE MINIMALISTE	APPROCHE MAXIMALISTE
recouvrement d'images	80%	80%
trajectoire de vol	trajectoire tondeuse simple	trajectoire tondeuse double
angle de la caméra	90 degrés	75 degrés
superficie	0,75 hectare	5 hectares
taille de la zone tampon	0 mètre (pas de zone tampon)	entre 10 et 150 mètres
altitude de vol	40 mètres	45 mètres

Cette approche a ainsi effectué deux vols de trois zones différentes, pour un total de six vols (Annexes 6 et 7). Le temps de vol total pour l'approche minimaliste était de 6 minutes, et s'élevait à 50 minutes pour l'approche maximaliste.

3.6.3. TRAITEMENT DES DONNÉES DE VOL

3.6.3.1. APPROCHE QUANTITATIVE

Pour chacun des 18 quadrats de 0,25 hectare, 24 photographies ont été capturées par le drone. Ces images ont ensuite été alignées et assemblées sur le logiciel Metashape pour créer un nuage de points, permettant de générer trois cartographies :

- **un Modèle Numérique de Surface (MNS)** : Les Modèles Numériques de Surface sont des représentations numériques de l'altitude qui illustrent la surface terrestre en incluant tous les éléments situés à la surface du sol (Géoportail de la Wallonie, s.d.-d). Les MNS générés offrent une résolution d'environ 0,05 m/pixel (Figure 18, Figures 5 des Annexes 8 à 25).
- **un Modèle Numérique de Terrain (MNT)** : Les Modèles Numériques de Terrain sont des représentations numériques de l'altitude qui illustrent la surface terrestre en excluant les éléments du sur-sol tels que la végétation haute et les constructions diverses (Mathys et al., 2009; Kasser et al., 2019). Les MNT générés offrent une résolution d'environ 0,05 m/pixel (Figure 19, Figures 7 des Annexes 8 à 25).
- **une orthomosaïque** : Une orthomosaïque est une assemblage d'orthophotographies. Une orthophotographie est une photographie corrigée géométriquement pour éliminer les distorsions de perspective, permettant ainsi sa superposition exacte avec une carte plane (Altametriz, s.d.). Les orthomosaïques générées offrent une résolution d'environ 0,01 m/pixel (Figure 20, Figures 1 des Annexes 8 à 25).

Les étapes à suivre pour la réalisation d'un Modèle Numérique de Surface (MNS), d'un Modèle Numérique de Terrain (MNT) et d'une orthomosaïque à partir d'images capturées à l'aide d'un drone, à l'aide du logiciel Agisoft Metashape Professional, ainsi que leur exportation dans un format utilisable dans des logiciels SIG sont détaillées sous forme de tutoriel dans l'Annexe 1.

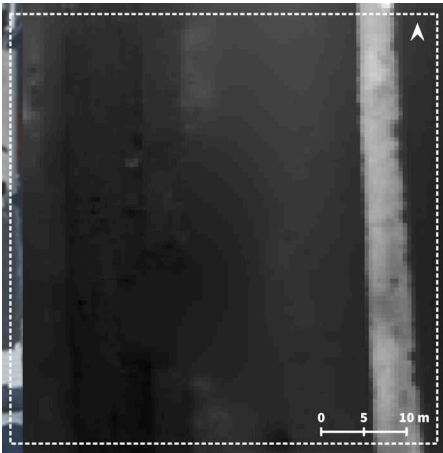


Figure 18 : *Modèle Numérique de Terrain du quadrat A, généré par photogrammétrie à partir des images capturées par le drone. Production personnelle.*

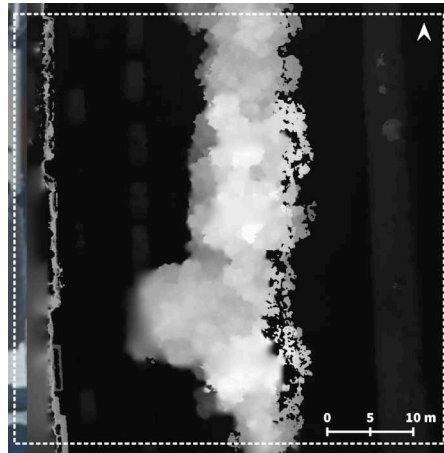


Figure 19 : *Modèle Numérique de Surface du quadrat A, généré par photogrammétrie à partir des images capturées par le drone. Production personnelle.*

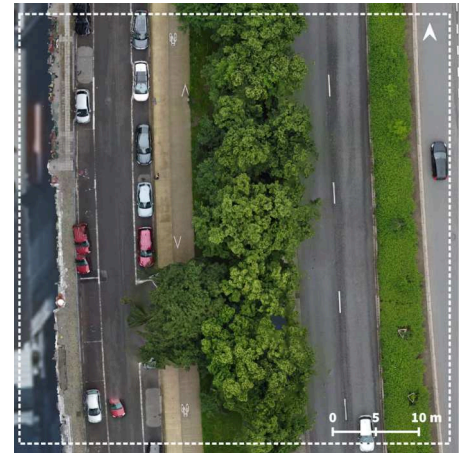


Figure 20 : *Orthomosaïque du quadrat A, générée par photogrammétrie à partir des images capturées par le drone. Production personnelle.*

3.6.3.2. APPROCHE QUALITATIVE

Pour chacun des 3 quadrats de 0,25 hectare, 24 photographies ont été capturées par le drone. L'approche maximaliste, couvrant des zones variant de 2 à 2,5 hectares, à quant à elle généré entre 265 et 340 images.

Ces photographies ont ensuite été alignées et assemblées sur le logiciel Metashape pour créer un nuage de points, permettant ensuite de générer un modèle 3D texturé. Ce modèle 3D est obtenu en réalisant un maillage du nuage de points.

Un maillage 3D est une modélisation géométrique d'un espace en un ensemble de facettes triangulaires adjacentes. Ces facettes triangulaires sont construites en reliant les points d'un nuage de points, dont les coordonnées en trois dimensions sont connues (Altametriz, s.d.) (Figure 21).

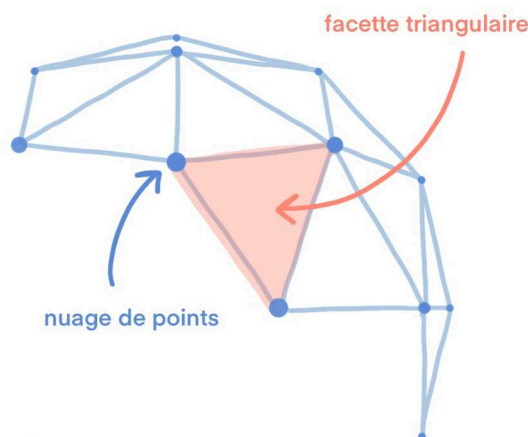


Figure 21 : *Maillage 3D, schéma explicatif. Production personnelle.*

Les étapes à suivre pour la réalisation d'un modèle 3D texturé à partir d'images capturées avec un drone, à l'aide du logiciel Agisoft Metashape Professional, sont détaillées sous forme de tutoriel dans l'Annexe 1.

3.6.4. COLLECTE DE DONNÉES

3.6.4.1. APPROCHE QUANTITATIVE

Cette section détaille le matériel et les méthodes utilisées pour la collecte de données des six indicateurs étudiés selon l'approche quantitative.

Chaque indicateur est traité en deux volets : le premier volet concerne la collecte des données issues du traitement photogrammétrique des images capturées par le drone, et le second volet porte sur la collecte des données de référence, obtenues à partir d'inventaires de terrain ou de cartographies fournies par le Service public de Wallonie et accessibles en ligne. Ces données de référence serviront ultérieurement à évaluer la précision des données recueillies par le drone.

Le temps nécessaire à la collecte de l'ensemble des données issues de l'inventaire par drone s'élève à 45 minutes de vol, auxquelles s'ajoutent environ 1h30 de traitement photogrammétrique et 3 heures d'extraction des données analysées. Deux personnes ont été mobilisées pour le vol du drone, avec la présence d'un observateur en plus du pilote pour assurer la sécurité de l'opération et une meilleure gestion des risques. Une seule personne a suffi pour le reste des opérations.

En comparaison, la collecte des données sur le terrain a nécessité deux jours complets et la mobilisation de deux personnes.

3.6.4.1.1. NOMBRE D'ARBRES

a. données photogrammétriques

Le nombre d'arbres présents au sein des quadrats d'observation a été défini à travers l'observation des orthomosaïques et des MNS (Figures 22 et 23, Figures 2 des Annexes 8 à 25).

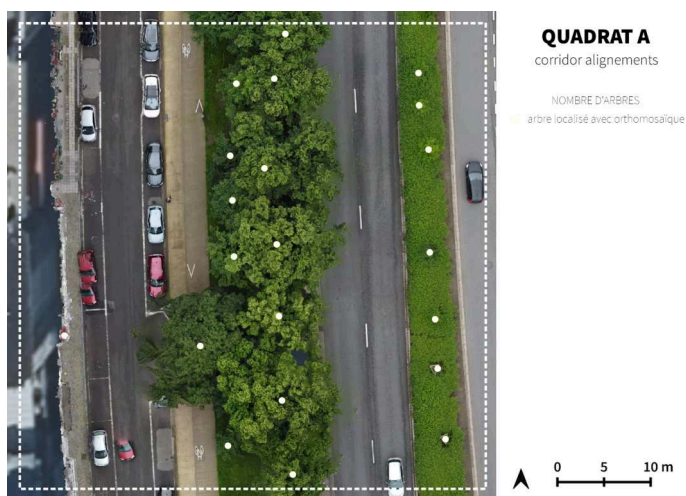


Figure 22 : Identification du nombre d'arbres dans le quadrat A à l'aide de l'orthomosaïque générée à partir des données drone. Production personnelle.

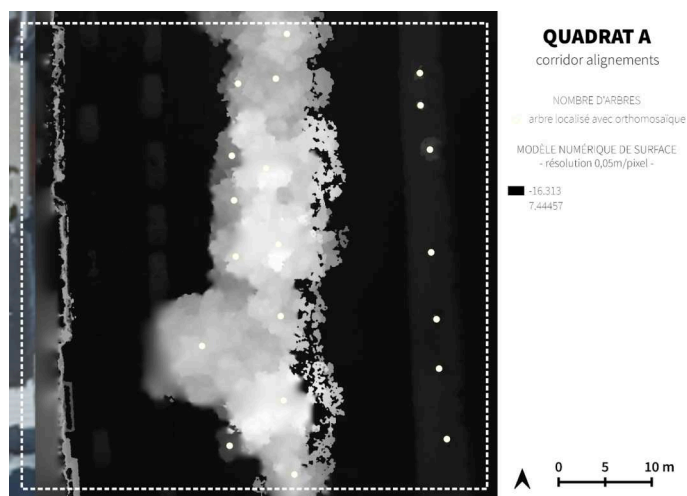


Figure 23 : Identification du nombre d'arbres dans le quadrat A à l'aide du MNS généré à partir des données drone. Production personnelle.

b. données de référence

Pour vérifier ces données, la position géographique de chaque arbre présent au sein des quadrats d'étude a été recensée à l'aide du GPS portable GPSMAP 64s de Garmin (Figure 24, Figures 2 des Annexes 8 à 25). Cet outil ayant une précision de position allant jusqu'à 3 à 5 mètres, les positions GPS obtenues ont ensuite été rectifiées à l'aide des orthomosaïques générées à partir des données drone (Figure 25, Figures 3 des Annexes 8 à 25).

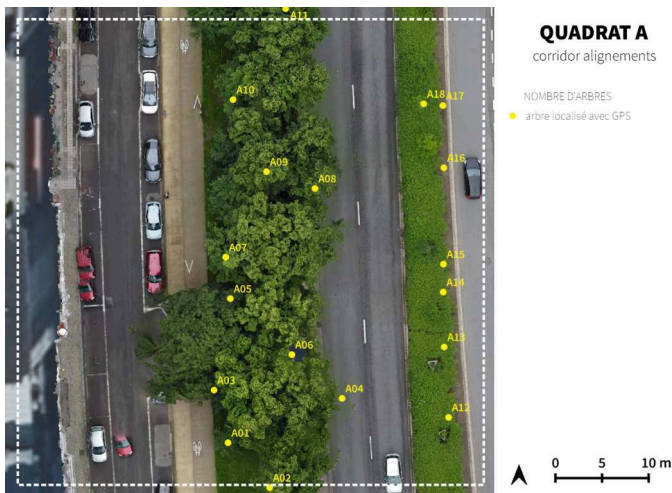


Figure 24 : Localisation du nombre d'arbres dans le quadrat A à partir d'inventaires de terrain, à l'aide du GPS Garmin. Production personnelle.

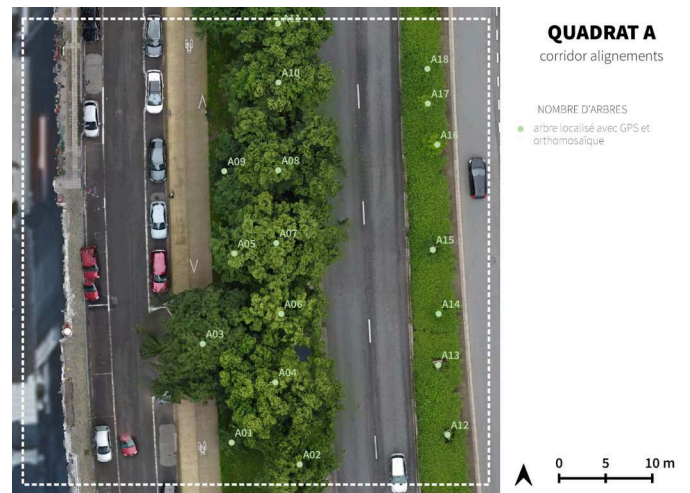


Figure 25 : Localisation du nombre d'arbres dans le quadrat A à partir d'inventaires de terrain, à l'aide du GPS Garmin et ensuite rectifiée à partir de l'observation de l'orthomosaïque générée à partir des données drone. Production personnelle.

3.6.4.1.2. RICHESSE EN ESPÈCES

a. données photogrammétriques

Le nombre d'espèces d'arbres identifiées à l'aide du drone a été inventorié à partir de l'observation des orthomosaïques (Figure 26, Figures 4 des Annexes 8 à 25). La distinction entre les espèces s'est faite à l'aide des critères suivants :

- la taille de l'individu
- la forme de son port
- la couleur de son feuillage
- la forme de ses feuilles, quand la résolution le permettait



Figure 26 : Identification du nombre d'espèces d'arbres présentes dans le quadrat A à l'aide de l'orthomosaïque générée à partir des données drone. Production personnelle.

b. données de référence

Les données de référence sur le nombre d'espèces présentes dans les quadrats d'observation ont ensuite été recueillies à l'aide d'inventaires de terrain, au cours desquels chaque espèce d'arbre a été identifiée (Tableau 2, Tableaux 1 des Annexes 8 à 25).

Tableau 2 : Tableau de recensement des espèces d'arbres identifiées dans le quadrat A, à partir d'un inventaire de terrain. Production personnelle.

QUADRAT A			
ARBRES	ESPÈCES RECENSÉES	ARBRES	ESPÈCES RECENSÉES
A01	<i>Tilia x europaea L.</i>	A10	<i>Tilia x europaea L.</i>
A02	<i>Tilia x europaea L.</i>	A11	<i>Tilia x europaea L.</i>
A03	<i>Aesculus hippocastanum L.</i>	A12	<i>Fraxinus angustifolia Vahl</i>
A04	<i>Tilia x europaea L.</i>	A13	<i>Fraxinus angustifolia Vahl</i>
A05	<i>Tilia x europaea L.</i>	A14	<i>Fraxinus angustifolia Vahl</i>
A06	<i>Tilia x europaea L.</i>	A15	<i>Fraxinus angustifolia Vahl</i>
A07	<i>Tilia x europaea L.</i>	A16	<i>Prunus avium (L.) L.</i>
A08	<i>Tilia x europaea L.</i>	A17	<i>Prunus avium (L.) L.</i>
A09	<i>Tilia x europaea L.</i>	A18	<i>Prunus avium (L.) L.</i>

3.6.4.1.3. STRUCTURE VERTICALE

Deux méthodes ont été employées pour analyser la structure verticale des arbres présents dans les quadrats d'observation :

○ MÉTHODE 1 :

La première méthode vise à comparer les valeurs de hauteur de tous les arbres présents au sein des 16 quadrats considérés qui intègrent une strate arborée. Elle compare les données tirées des MNS générés à l'aide des données drone, avec les valeurs extraites du Modèle Numérique de Hauteur (MNH) de la couche de données LiDAR acquises par le Service public de Wallonie entre 2021 et 2022 (Figures 6 et 9 des Annexes 8 à 25).

Pour minimiser les erreurs susceptibles de fausser les résultats, seuls les arbres âgés de plus de 3 ans, et donc visibles sur le MNH, ont été considérés. De plus, en cas de groupements d'arbres, seul l'individu le plus haut était considéré.

a. données photogrammétriques

La première méthode utilise les MNS avec une résolution réduite à 2 m/pixel (Figures 6 des Annexes 8 à 25). Elle procède de la manière suivante :

Hauteur de l'arbre = valeur du MNS du point au sommet de l'arbre - valeur du MNS d'un point au sol, à proximité directe de l'arbre

où la "valeur du MNS d'un point au sol, à proximité directe de l'arbre" sert de référence approximative pour le Modèle Numérique de Terrain.

b. données de référence

Les données de référence de cette première méthode se basent sur le Modèle Numérique de Hauteur (MNH) de la couche de données LiDAR acquises par le Service public de Wallonie entre 2021 et 2022, de résolution égale à 2 m/pixel, et disponible sur le Géoportail de la Wallonie (Géoportail de la Wallonie, s.d.-b) (Figures 9 des Annexes 8 à 25).

Le LiDAR (acronyme anglais de Light Detection And Ranging pour détection et télémétrie par ondes lumineuses) est une technique de télédétection qui utilise la lumière laser pour générer un nuage de points en 3D, de densité élevée et d'une grande précision (Géoportail de la Wallonie, s.d.-b; Jacobs, 2023). Contrairement au drone, le LiDAR est capable de pénétrer la végétation pour recueillir des informations sur le sol sous-jacent.

Le MNH correspond au MNS, duquel on a soustrait le MNT. Il illustre donc la hauteur de tous les éléments situés à la surface du sol en excluant la surface terrestre (Géoportail de la Wallonie, s.d.-b) (Figure 27).

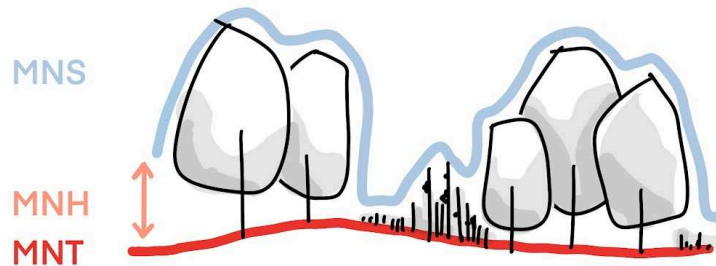


Figure 27 : *Modèle Numérique de Surface, Modèle Numérique de Terrain et Modèle Numérique de Hauteur, schéma explicatif. Production personnelle.*

○ MÉTHODE 2 :

La deuxième méthode compare les valeurs de hauteur d'un seul arbre, sélectionné dans chacun des quadrats qui intègrent une strate arborée. Les 16 individus choisis forment les arbres les plus isolés de chaque quadrat.

Cette méthode compare les données issues des MNS générés à l'aide des données drone, avec les valeurs obtenues à l'aide d'un vertex.

a. données photogrammétriques

Les données obtenues par photogrammétrie ont été calculées à partir des MNS générés avec une résolution maximale (environ 0,05 m/pixel) (Figures 5 des Annexes 8 à 25).

La hauteur de chaque arbre sélectionné est déterminée de la même manière que dans la méthode précédente, soit :

$$\text{Hauteur de l'arbre} = \text{valeur du MNS du point au sommet de l'arbre} - \text{valeur du MNS d'un point au sol, à proximité directe de l'arbre}$$

où la "valeur du MNS d'un point au sol, à proximité directe de l'arbre" sert de référence approximative pour le Modèle Numérique de Terrain.

b. données de référence

Les données de référence de la seconde méthode sont obtenues à l'aide d'un Vertex, qui calcule la hauteur des 16 arbres sélectionnés.

Le vertex est un outil de foresterie, principalement utilisé pour mesurer la hauteur des arbres (Mbock et al. 2018). Il utilise une méthode de triangulation en envoyant des signaux ultrasoniques entre un émetteur-récepteur, placé à une position où la distance horizontale est plus élevée que la hauteur de l'arbre, et un réflecteur, placé à 1,30 mètre du pied de l'arbre (Mbock et al. 2018). Le vertex mesure la hauteur des arbres en combinant des mesures de distance horizontale et des angles de visée, à l'aide de la triangulation (Mbock et al. 2018) (Figure 28).

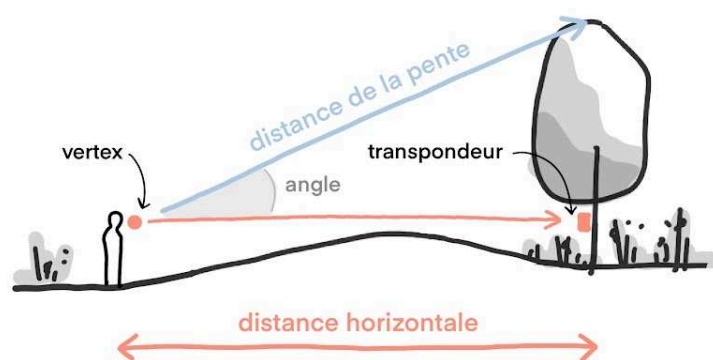


Figure 28 : Fonctionnement du vertex forestier, schéma explicatif. Production personnelle.

3.6.4.1.4. AIRE DE LA COURONNE

Cet indicateur compare l'aire de la couronne d'un arbre, sélectionné dans chacun des quadrats qui intègrent une strate arborée, avec son diamètre à hauteur de poitrine, obtenu à partir d'inventaires de terrain.

Ces deux données sont mises en relation car le recensement d'une aire de couronne sur le terrain est une opération complexe, et car il existe une corrélation entre le diamètre du tronc à hauteur de poitrine et l'aire de la couronne (Blanchard et al., 2016).

Les 16 individus choisis forment les arbres les plus isolés de chaque quadrat.

a. données photogrammétriques

Les données d'aire de couronne ont été calculées à partir des orthomosaïques, via QGIS, en créant manuellement une couche Shapefile Polygone qui suit les contours de la couronne. L'aire de chaque polygone a ensuite été calculée avec la Calculatrice de Champ, en créant le nouveau champ "\$area". (Figure 29, Figures 10 des Annexes 8 à 25)

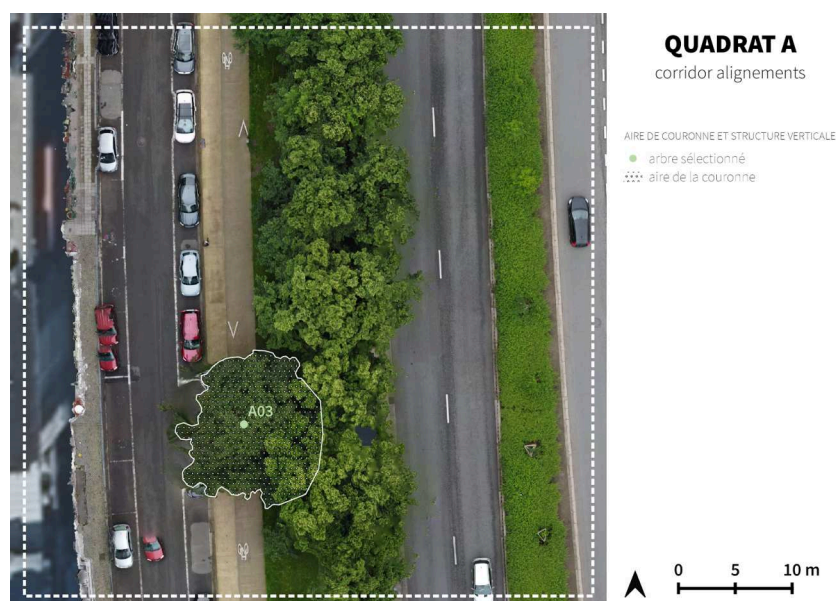


Figure 29 : Identification de l'aire de la couronne de l'arbre sélectionné pour le quadrat A, à l'aide de l'orthomosaïque générée à partir des données drone. Production personnelle.

b. données de référence

Les données d'aire de couronne obtenues ont été comparées à des mesures de diamètre du tronc à hauteur de poitrine (DBH) inventoriées sur le terrain.

Le DBH a été mesuré à l'aide d'un mètre ruban placé à 1,30 mètre du pied des 16 arbres sélectionnés. La donnée obtenue, correspondant à la circonférence du tronc, a ensuite été convertie en diamètre à l'aide de la formule suivante :

$$d = C/\pi$$

où d est le diamètre et C est la circonférence.

3.6.4.1.5. RECOUVREMENT VÉGÉTAL

a. données photogrammétriques

Le pourcentage de recouvrement de chaque strate végétale des 18 quadrats a été déterminé à vue d'œil, à travers l'observation des MNS et des orthomosaïques (Figure 30).

b. données de référence

Le pourcentage de recouvrement de chaque strate végétale des 18 quadrats a été déterminé à vue d'œil, à travers des observations de terrain (Figure 31).

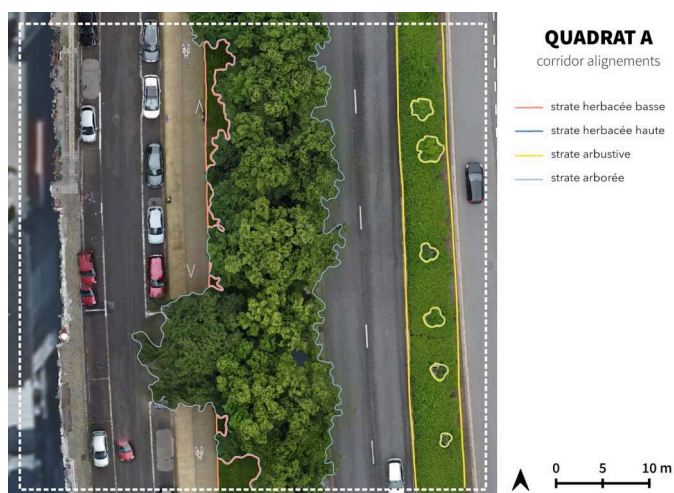


Figure 30 : Identification du pourcentage de recouvrement de chaque strate végétale présente au sein du quadrat A, à l'aide de l'orthomosaïque générée à partir des données drone. Production personnelle.

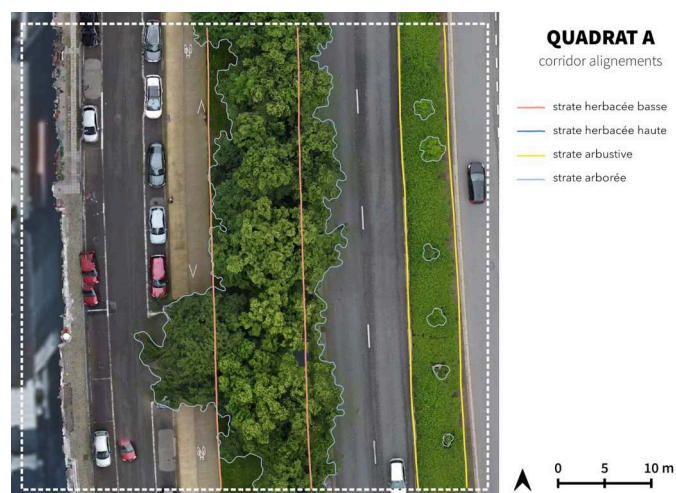


Figure 31 : Identification du pourcentage de recouvrement de chaque strate végétale présente au sein du quadrat A, à partir d'inventaires de terrain. Production personnelle.

3.6.4.1.6. TOPOGRAPHIE

Pour évaluer l'exactitude des données topographiques extraites par le traitement photogrammétrique des images capturées avec le drone, trois points aléatoires A, B et C ont été définis dans chaque quadrat (Figures 32 et 33). Les différences altimétriques entre ces trois points ont ensuite été calculées à l'aide des MNT issus des données drone, et comparées avec les valeurs issues du MNT de la couche de données LiDAR, acquises par le Service public de Wallonie entre 2021 et 2022. Ces différences altimétriques ont été calculées comme suit :

Donnée topographique 1 = valeur MNT point A - valeur MNT point B
 Donnée topographique 2 = valeur MNT point B - valeur MNT point C
 Donnée topographique 3 = valeur MNT point C - valeur MNT point A

a. données photogrammétriques

Les différences altimétriques entre les trois points aléatoirement sélectionnés ont été calculées à l'aide des MNT générés à partir des données drone, de résolution réduite à 0,5 m/pixel (Figure 32, Figures 7 des Annexes 8 à 25).

b. données de référence

Les données de référence ont été calculées à l'aide du Modèle Numérique de Terrain de la couche de données LiDAR, acquises par le Service public de Wallonie entre 2021 et 2022, disponible sur le Géoportail de la Wallonie (Géoportail de la Wallonie, s.d.-e), de résolution 0,5 m/pixel (Figure 33, Figures 8 des Annexes 8 à 25).

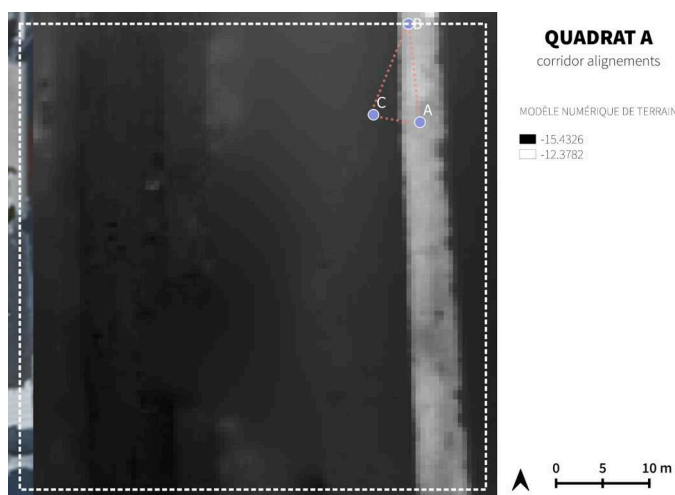


Figure 32 : Modèle Numérique de Terrain du quadrat A, généré à l'aide des données drone, et localisation des 3 points aléatoirement sélectionnés pour l'indicateur de topographie. Production personnelle.

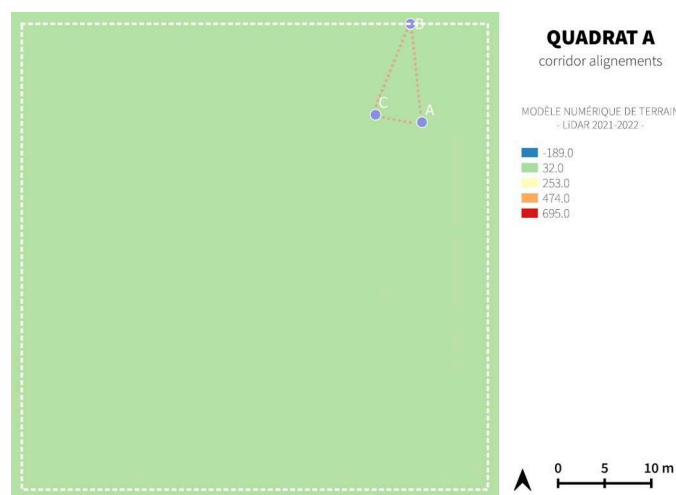


Figure 33 : Modèle Numérique de Terrain du quadrat A, généré à l'aide des données LiDAR 2021, et localisation des 3 points aléatoirement sélectionnés pour l'indicateur de topographie. Production personnelle.

3.6.4.2. APPROCHE QUALITATIVE

Cette section détaille le matériel et les méthodes utilisés pour la collecte de données de l'approche qualitative. Celle-ci se base sur la comparaison des données de capture et de reconstruction 3D entre les vols réalisés avec un paramétrage minimaliste et maximaliste

3.6.4.2.1. DONNÉES DE CAPTURE

Les données relatives aux temps de vol et au nombre d'images capturées ont été enregistrées sur le terrain, tandis que les données de capture liées à la reconstruction photogrammétrique des modèles 3D ont été extraites de l'espace de travail du logiciel Metashape, utilisé pour le traitement des photographies prises par le drone (Annexe 1).

3.6.4.2.2. OBSERVATIONS DES RECONSTRUCTIONS 3D

Les reconstructions 3D obtenues par photogrammétrie ont été analysées dans le logiciel Metashape, et intégrées dans ce rapport sous forme d'images capturées depuis cinq points de vue différents :

- deux vues plongeantes de face
- deux vues plongeantes obliques
- une vue immersive.

3.7. MISE EN FORME DES RÉSULTATS

3.7.1. APPROCHE QUANTITATIVE

Les résultats de l'approche quantitative ont été présentés sous la forme de diagrammes de dispersion. Ce type de graphique permet de représenter la relation qui existe entre deux ensembles de données quantitatives. Dans le cadre de ce travail, ces diagrammes mettent en relation les données collectées par le drone, représentées par l'axe des ordonnées, avec les données de référence, représentées par l'axe des abscisses. Ces données prennent ainsi la forme d'un nuage de points, où chaque point représente une observation avec deux valeurs : une valeur collectée avec le drone et une valeur collectée sur le terrain (ou autre valeur de référence). Les symboles des points sont différenciés en fonction de la typologie à laquelle ils se réfèrent.

Pour permettre une visualisation plus aisée de la relation entre les valeurs x et y , une courbe de tendance linéaire, d'équation $x=y$ a été tracée. Cette droite, qualifiée de "situation théorique" représente une relation de proportionnalité parfaite entre les deux variables.

Ainsi, plus le nuage de point suit la courbe de tendance, plus les données collectées par photogrammétrie à l'aide du drone sont identiques aux données de référence. Les points situés au-dessus de cette courbe de tendance indiquent une surestimation des données collectées avec le drone par rapport aux données de référence, tandis que les points situés en dessous de la courbe de tendance traduisent une sous-estimation.

Concernant l'indicateur de recouvrement végétal, les résultats ont été présentés sous forme de tableaux comparatifs. Ce choix facilite la visualisation des résultats, compte tenu du nombre de catégories de strates végétales analysées.

3.7.2. APPROCHE QUALITATIVE

Les résultats de l'approche qualitative sont présentés sous forme de tableaux comparatifs, qui mettent en relation les résultats obtenus avec l'approche minimaliste et ceux obtenus avec l'approche maximaliste.

4. RÉSULTATS

4.1. APPROCHE QUANTITATIVE

4.1.1. NOMBRE D'ARBRES

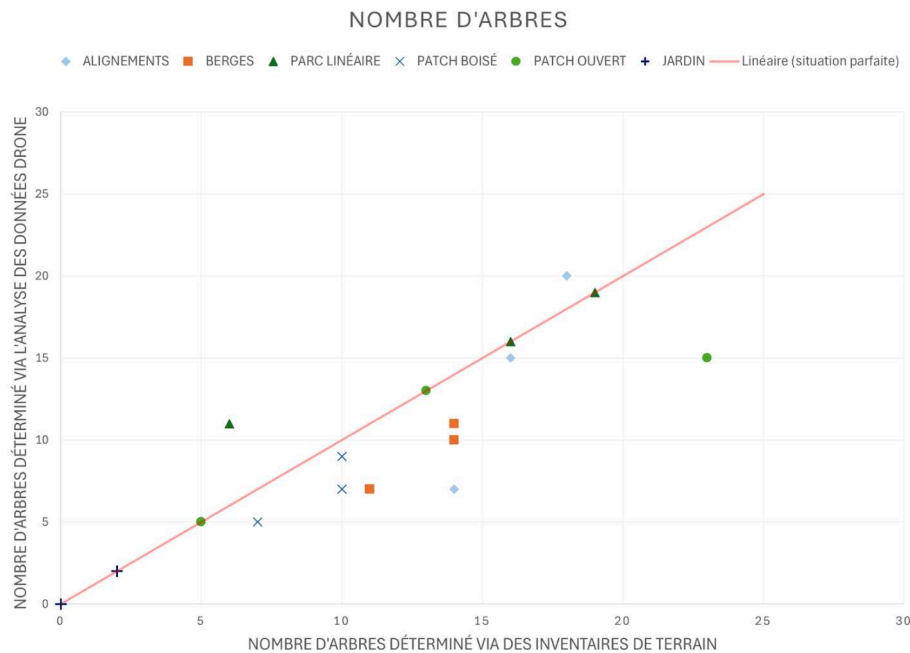


Figure 34 : Diagramme de dispersion du nombre d'arbres présents dans chaque typologie de végétation, obtenu à partir d'inventaires de terrain (axe des x) et d'observations des orthomosaïques et des MNS générés à partir des images capturées par le drone (axe des y). Ce diagramme inclut une courbe de tendance illustrant une relation de proportionnalité parfaite entre les deux variables (situation théorique).
Production personnelle.

Les valeurs obtenues par les observations des orthomosaïques et des MNS générés à l'aide des images capturées par le drone ont tendance à sous-estimer le nombre d'arbres par rapport aux données collectées avec le GPS Garmin (Figure 34).

Sur les 18 quadrats considérés, l'analyse des données collectées à l'aide du drone a permis de correctement identifier le nombre d'arbres dans 7 quadrats. Elle a sous-estimé le nombre d'arbres pour 50% quadrats, soit pour 9 des 18 quadrats observés et a surestimé le nombre d'arbres dans 2 quadrats (Figure 34).

Dans 50% des quadrats, l'écart-type par rapport à la situation théorique est égal ou inférieur à un arbre (Figure 34).

La typologie où le nuage de points correspond parfaitement à la courbe de tendance, avec un écart-type nul, est celle des zones de jardin. La typologie avec la plus grande sous-estimation du nombre d'arbres avec les données collectées par le drone par rapport aux valeurs de référence est celle des berges végétalisées, avec un écart-type de 11 arbres sur un total de 39 arbres. Cela signifie que 30% des arbres de cette typologie ne sont pas visibles sur les orthomosaïques et les MNS construits à partir des images capturées par le drone. Enfin, la typologie avec la plus grande surestimation est celle des parcs linéaires, où l'analyse des données collectées avec le drone a ajouté 5 individus fictifs aux 41 arbres qui composent cette typologie (Figure 34).

4.1.2. RICHESSE EN ESPÈCE

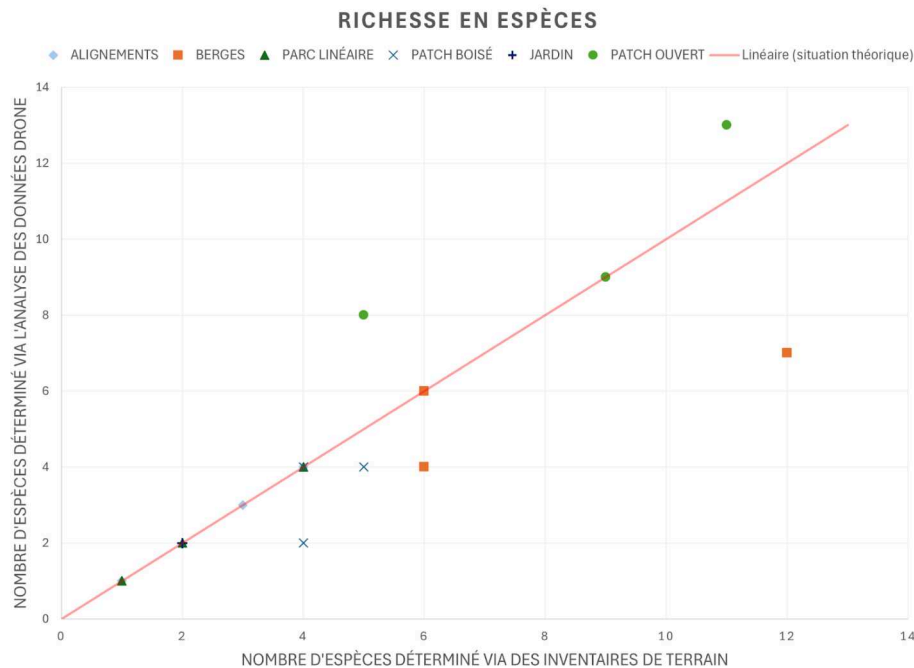


Figure 35 : Diagramme de dispersion du nombre d'espèces d'arbres présentes dans chaque typologie de végétation, obtenu à partir d'inventaires de terrain (axe des x) et d'observations des orthomosaïques générées à partir des images capturées par le drone (axe des y). Ce diagramme inclut une courbe de tendance illustrant une relation de proportionnalité parfaite entre les deux variables (situation théorique). Production personnelle.

L'analyse des orthomosaïques générées à partir des images prises par le drone a dénombré le même nombre d'espèces d'arbre que l'inventaire de terrain pour 11 quadrats parmi les 16 qui intègrent une strate arborée. L'analyse par drone a surestimé le nombre d'espèces d'un quadrat et pour quatre quadrats, elle l'a sous-estimé (Figure 35).

Le nuage de point suit parfaitement la courbe de tendance pour les valeurs inférieure à 4 espèces d'arbres. Lorsque le nombre d'espèces identifiées à travers les inventaires de terrain dépasse ce seuil, des écarts apparaissent entre les données obtenues et la situation théorique (Figure 35).

Les typologies avec le plus grand nombre d'espèces sont les berges végétalisées (24 espèces), les zones ouvertes (25 espèces) et les zones boisées (13 espèces), elles sont également les seules à présenter des écarts-types :

- **Zones ouvertes** : écart-type de 2 espèces en surestimation par rapport à la situation théorique
- **Zones boisées** : écart-type de 3 espèces en sous-estimation par rapport à la situation théorique
- **Berges végétalisées** : écart-type de 7 espèces en sous-estimation par rapport à la situation théorique

Pour les typologies des zones de jardin, des alignements d'arbres de rue et des parcs linéaires, le nombre d'espèces obtenu via l'analyse par drone correspond exactement à celui des inventaires de terrain. Ces typologies sont également celles qui présentent une moindre diversité d'espèces (Figure 35).

L'écart-type moyen entre le nuage de points et la situation théorique s'élève à 0,75 espèce, pour les 16 quadrats inventoriés (Figure 35).

4.1.3. STRUCTURE VERTICALE

○ MÉTHODE 1 :

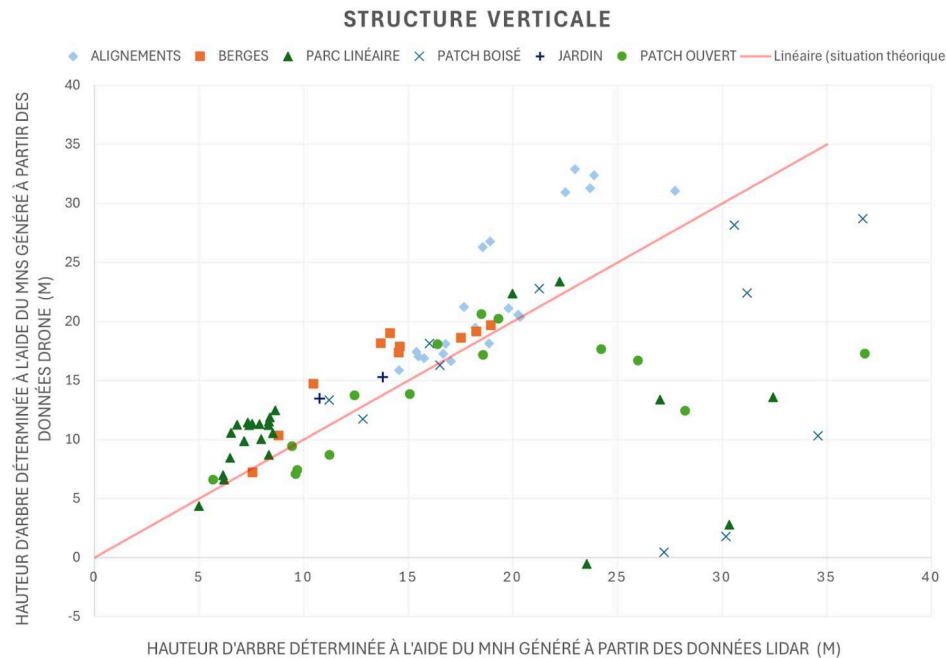


Figure 36 : Diagramme de dispersion de la hauteur des arbres présents dans chaque typologie de végétation, obtenue à partir des valeurs du MNH généré à partir de données LiDAR de 2021 (axe des x) et des valeurs des MNS générés à partir des images capturées par le drone (axe des y). Ce diagramme inclut une courbe de tendance illustrant une relation de proportionnalité parfaite entre les deux variables (situation théorique). Production personnelle.

Le graphique ci-dessus, qui compare les données de hauteur d'arbres recueillies à l'aide des MNS générés par les données drone, avec les valeurs du MNH issu des données LiDAR, illustre une relation assez proportionnelle entre les deux variables, pour les valeurs de hauteur n'excédant pas 18 mètres. En dessous de ce seuil, l'écart-type moyen entre le nuage de points et la situation théorique s'élève à 2,15 mètres (Figure 36).

Lorsque la hauteur d'arbre déterminée par le MNH dépasse les 18 mètres, la marge d'erreur devient très importante, tant en sous-estimation, pour la typologie des alignements d'arbres de rue, qu'en surestimation, pour les typologies des zones ouvertes, boisées et des berges végétalisées, avec des écart-types supérieurs à 8 mètres par rapport à la situation théorique. Le plus grand écart-type en sous-estimation est de 28 mètres, tandis que le plus grand écart-type en surestimation est de 10 mètres, par rapport à la situation théorique (Figure 36).

De plus, une fois ce seuil de 18 mètres dépassé, des données aberrantes apparaissent dans les valeurs des MNS issus des données drone, indiquant des arbres avec des hauteurs proches de zéro ou même négatives (Figure 36).

À l'inverse, lorsque la hauteur d'arbre déterminée par le MNH n'excède pas 18 mètres, les données issues de l'analyse par drone ont plutôt tendance à surestimer la hauteur des arbres par rapport aux valeurs du MNH (Figure 36).

C'est entre 15 et 18 mètres de hauteur en abscisse que le nuage de points suit le plus la trajectoire de la situation théorique. Et donc que les données obtenues à travers l'analyse par drone sont les plus identiques aux données de référence issues du MNH (Figure 36).

○ MÉTHODE 2 :

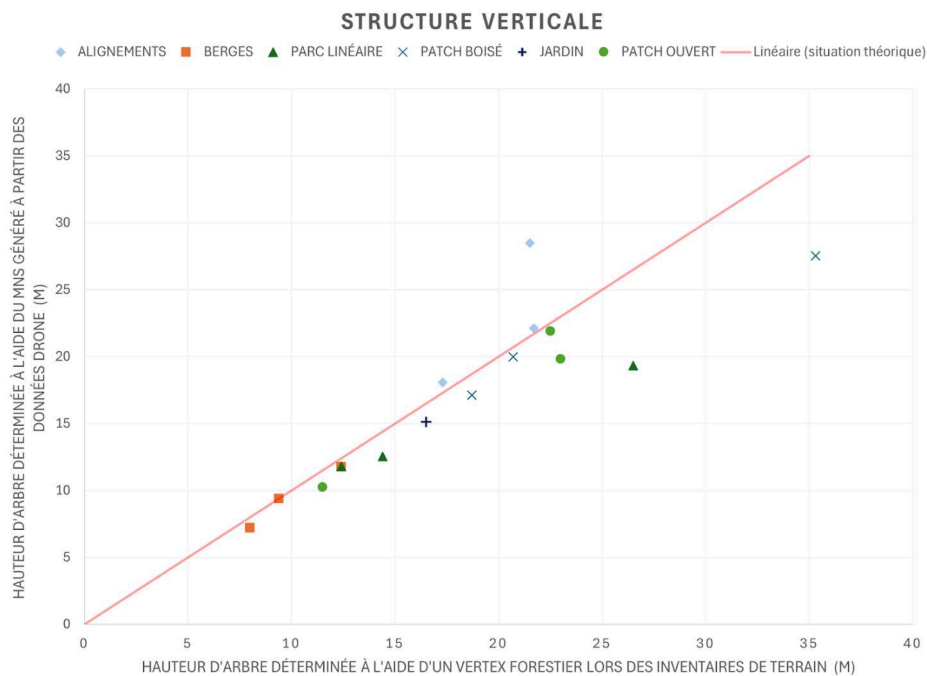


Figure 37 : Diagramme de dispersion de la hauteur d'un arbre par quadrat, obtenue à partir d'inventaires de terrain, à l'aide d'un vertex forestier (axe des x) et des valeurs des MNS générés à partir des images capturées par le drone (axe des y). Ce diagramme inclut une courbe de tendance illustrant une relation de proportionnalité parfaite entre les deux variables (situation théorique). Production personnelle.

La mise en relation des données de hauteur d'arbres recueillies à partir des MNS avec les valeurs obtenues sur le terrain à l'aide du vertex forestier présente des similarités avec le graphique précédent (Figures 36 et 37). En effet, ici aussi, lorsque la hauteur d'arbre excède une certaine hauteur l'écart-type entre le nuage de point et la situation théorique devient plus important. Dans le cas présent, la valeur de ce seuil équivaut à 21,5 mètres. La marge d'erreur varie entre 3 et 8 mètres de sous-estimation, et 7 mètres de surestimation par rapport à la situation théorique (Figure 37).

À l'inverse du graphique précédent, lorsque les hauteurs d'arbres sont les plus faibles (entre 8 et 21,5 mètres) les valeurs issues de l'analyse des données générées par le drone ont tendance à très faiblement sous-estimer les hauteurs d'arbres par rapport aux valeurs obtenues avec le vertex forestier. Pour les valeurs d'abscisse comprises entre 8 et 21,5 mètres, l'écart-type moyen, par rapport à la situation théorique, est de 0,99 mètre, avec une moyenne de 0,94 mètre de sous-estimation, et de 0,07 mètre de surestimation (Figure 37).

4.1.4. AIRE DE LA COURONNE

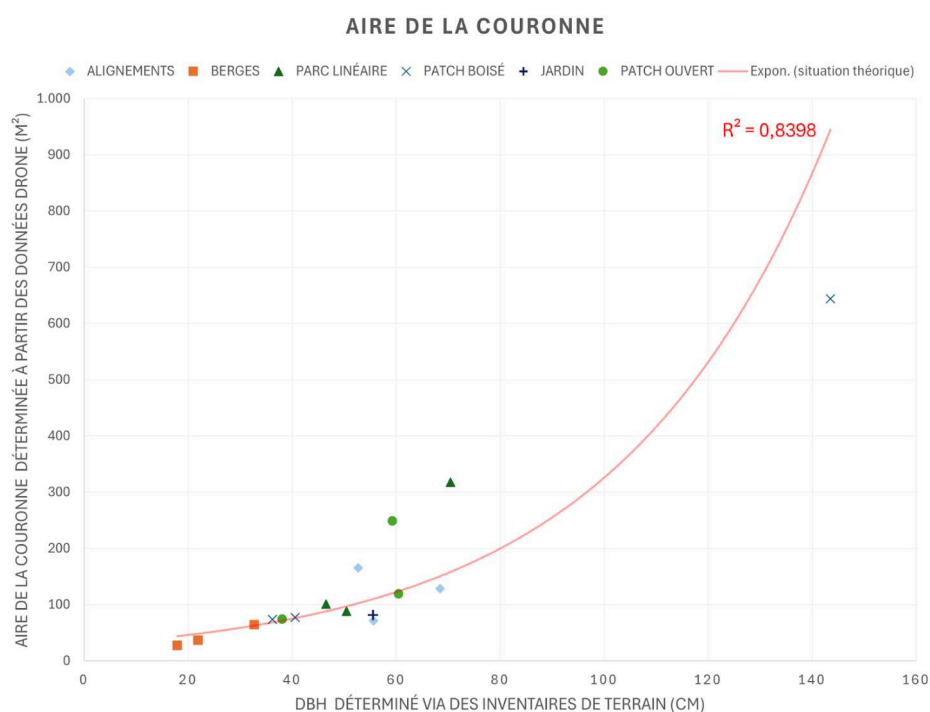


Figure 38 : Diagramme de dispersion illustrant la relation entre le DBH d'un arbre par quadrat, obtenu à partir d'inventaires de terrain (axe des x) et l'aire de sa couronne, obtenue via la mesure des orthomosaïques générées à partir des images capturées par le drone (axe des y). Ce diagramme inclut une courbe de tendance exponentielle ($R^2 = 0,8398$) illustrant une corrélation entre les deux variables (situation théorique). Production personnelle.

Pour cet indicateur, le nuage de points ne suit plus la trajectoire d'une situation théorique d'équation $x=y$, car les valeurs mises en relation sont des mètres au carré avec des centimètres. Étant donné la corrélation qu'il existe entre le diamètre du tronc à hauteur de poitrine et l'aire de la couronne, la courbe qui approxime le mieux la relation entre ces deux variables est de nature exponentielle (Figure 38).

Le coefficient de détermination de cette courbe exponentielle est de 0,84, ce qui indique une forte corrélation entre les données d'aire de couronne obtenues par drone et les données de DBH issues des inventaires de terrain (Figure 38).

Lorsque les valeurs sont faibles, avec un DBH inférieur à 45 cm et une aire de couronne déterminée à partir des orthomosaïques inférieure à 100 m², le nuage de point suit la tendance de la courbe exponentielle. Lorsque les valeurs de DBH et d'aire de couronne dépassent ce seuil, l'écart-type entre les données collectées et la courbe exponentielle augmente. Une valeur extrême, avec un DBH de 143 centimètres, se distingue nettement du reste du nuage de points. Cela souligne l'importante plage de données non couverte pour les valeurs de DBH comprises entre cette valeur extrême et la deuxième plus grande, qui est de 70 centimètres (Figure 38).

4.1.5. RECOUVREMENT VÉGÉTAL

Tableau 3 : Tableau comparatif des pourcentages de recouvrement de chaque strate végétale obtenus à partir d'inventaires de terrain (colonne de gauche) et d'observations des orthomosaïques et des MNS générés à partir des images capturées par le drone (colonne de droite) pour la typologie corridor - alignements d'arbres. Production personnelle.

QUADRAT CORRIDOR ALIGNEMENTS		
STRATES	INVENTAIRE DE TERRAIN	DRONE
strate arborée (en %)	45	45
strate arbustive (en %)	6,67	6,67
strate herbacée haute (en %)	0,67	0,67
strate herbacée basse (en %)	25	2,33

Tableau 4 : Tableau comparatif des pourcentages de recouvrement de chaque strate végétale obtenus à partir d'inventaires de terrain (colonne de gauche) et d'observations des orthomosaïques et des MNS générés à partir des images capturées par le drone (colonne de droite) pour la typologie corridor - berges végétalisées. Production personnelle.

QUADRAT CORRIDOR BERGES VÉGÉTALISÉES		
STRATES	INVENTAIRE DE TERRAIN	DRONE
strate arborée (en %)	24	24
strate arbustive (en %)	-	-
strate herbacée haute (en %)	10,67	8,33
strate herbacée basse (en %)	60	36,67

Tableau 5 : Tableau comparatif des pourcentages de recouvrement de chaque strate végétale obtenus à partir d'inventaires de terrain (colonne de gauche) et d'observations des orthomosaïques et des MNS générés à partir des images capturées par le drone (colonne de droite) pour la typologie corridor - parcs linéaires. Production personnelle.

QUADRAT CORRIDOR PARCS LINÉAIRES		
STRATES	INVENTAIRE DE TERRAIN	DRONE
strate arborée (en %)	46,67	44
strate arbustive (en %)	1,5	1
strate herbacée haute (en %)	1,33	-
strate herbacée basse (en %)	17,67	14

Tableau 6 : Tableau comparatif des pourcentages de recouvrement de chaque strate végétale obtenus à partir d'inventaires de terrain (colonne de gauche) et d'observations des orthomosaïques et des MNS générés à partir des images capturées par le drone (colonne de droite) pour la typologie patch - zones boisées. Production personnelle.

QUADRAT PATCH ZONES BOISÉES		
STRATES	INVENTAIRE DE TERRAIN	DRONE
strate arborée (en %)	60	55
strate arbustive (en %)	2	0,67
strate herbacée haute (en %)	0,67	-
strate herbacée basse (en %)	31,67	13,33

Tableau 7 : Tableau comparatif des pourcentages de recouvrement de chaque strate végétale obtenus à partir d'inventaires de terrain (colonne de gauche) et d'observations des orthomosaïques et des MNS générés à partir des images capturées par le drone (colonne de droite) pour la typologie patch - zones de jardin. Production personnelle.

QUADRAT PATCH ZONES DE JARDIN		
STRATES	INVENTAIRE DE TERRAIN	DRONE
strate arborée (en %)	1,67	1,67
strate arbustive (en %)	10,33	10
strate herbacée haute (en %)	1,67	1,67
strate herbacée basse (en %)	46,67	46,67

Tableau 8 : Tableau comparatif des pourcentages de recouvrement de chaque strate végétale obtenus à partir d'inventaires de terrain (colonne de gauche) et d'observations des orthomosaïques et des MNS générés à partir des images capturées par le drone (colonne de droite) pour la typologie patch - zones ouvertes. Production personnelle.

QUADRAT PATCH ZONES OUVERTES		
STRATES	INVENTAIRE DE TERRAIN	DRONE
strate arborée (en %)	38,33	38,33
strate arbustive (en %)	3,33	3
strate herbacée haute (en %)	2,67	-
strate herbacée basse (en %)	60	35

Les tableaux comparatifs de cet indicateur mettent en relation les pourcentages de recouvrement de chaque strate végétale identifiés à travers l'observation des orthomosaïques et des MNS générés par les données drone avec les valeurs déterminées par les inventaires de terrain (Tableaux 3 à 8).

Ces résultats indiquent que plus le couvert arboré est dense, plus le pourcentage de recouvrement des strates inférieures est sous-estimé par l'analyse à l'aide du drone. Pour une moyenne de 40% de recouvrement de la strate herbacée basse, l'écart-type s'élève à 15,50% de sous-estimation par rapport à l'inventaire de terrain. Cela signifie que la strate herbacée basse est en moyenne sous-estimée de 38,75%. En revanche, pour une moyenne de 30% de recouvrement de la strate arborée, l'écart-type s'élève à 1,8% sous-estimation par rapport à l'inventaire de terrain. Cela signifie que la strate arborée est en moyenne sous-estimée de 6% (Tableaux 3 à 8).

La typologie qui comptabilise l'écart-type le plus faible entre les pourcentages de recouvrement de chaque strate végétale identifiés à l'aide des orthomosaïques et des MNS et d'après les valeurs déterminées par les inventaires de terrain est celle des zones de jardin. Cette typologie est également celle où le pourcentage de recouvrement de la strate arborée est le plus faible (Tableau 7).

4.1.6. TOPOGRAPHIE

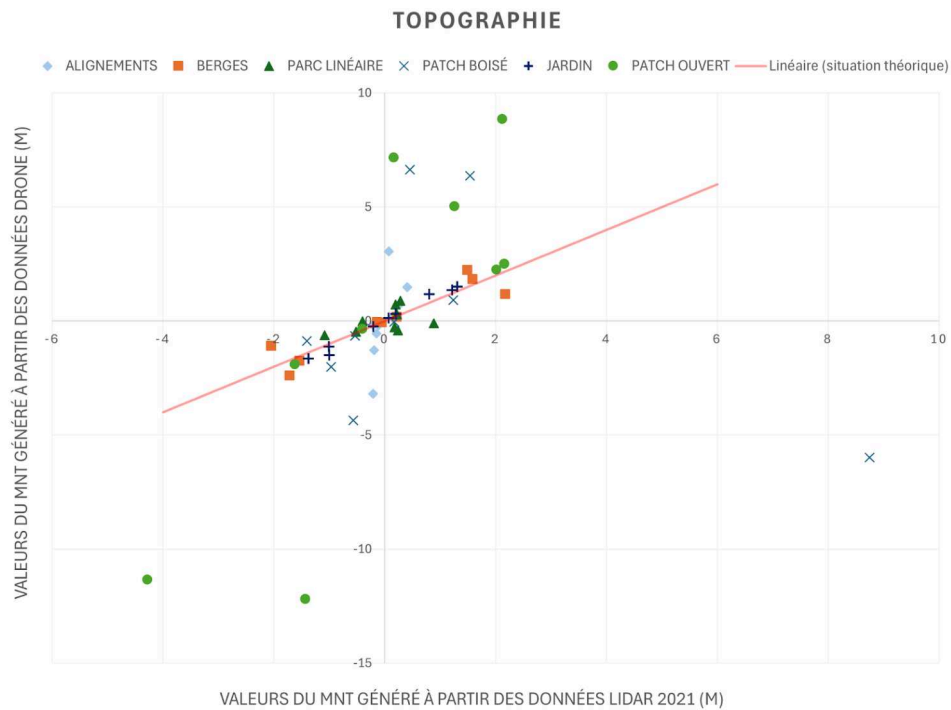


Figure 39 : Diagramme de dispersion des différences altimétriques entre trois points sélectionnés aléatoirement au sein de chaque quadrat (A, B et C), obtenues à partir des valeurs du MNT généré à partir de données LiDAR de 2021 (axe des x) et des valeurs des MNT générés à partir des images capturées par le drone (axe des y). Ce diagramme inclut une courbe de tendance illustrant une relation de proportionnalité parfaite entre les deux variables (situation théorique). Production personnelle.

Plus la différence altimétrique entre les trois points aléatoires est faible, et donc proche de zéro, plus les valeurs obtenues avec les MNT issus des données drone sont identiques à celles obtenues avec le MNT généré à partir des données LiDAR. En revanche, une plus grande différence altimétrique, qu'elle soit positive ou négative, entraîne une divergence marquée entre les données du drone et celles du LiDAR. Le plus grand écart-type observé s'élève à 14,73 mètres de sous-estimation (Figure 39).

Un recouvrement important de la strate arborée est associé à un écart-type plus élevé entre les données obtenues à l'aide du drone et les valeurs du LiDAR (Figure 38). À l'inverse, pour les typologies les moins boisées, comme les zones de jardin et les berges végétalisées, les écarts-types entre les données obtenues et la situation théorique sont les plus faibles (Figures 40 et 41). L'écart-type moyen observé entre le nuage de points et la situation théorique pour la typologie des zones de jardin est de 0,29 mètre, tandis que l'écart-type moyen, toutes typologies confondues, s'élève à 1,61 mètre (Figure 39 et 40).

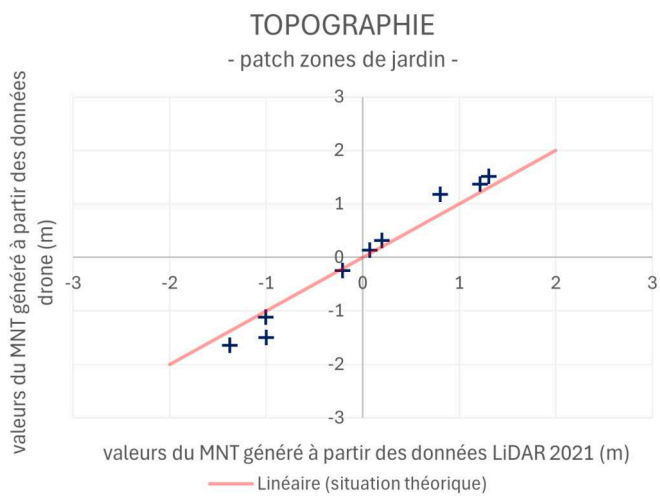


Figure 40 : Diagramme de dispersion des différences altimétriques entre trois points sélectionnés aléatoirement au sein des trois quadrats de la typologie "zones de jardin" (A, B et C), obtenues à partir des valeurs du MNT généré à partir de données LiDAR de 2021 (axe des x) et des valeurs des MNT générés à partir des images capturées par le drone (axe des y). Ce diagramme inclut une courbe de tendance illustrant une relation de proportionnalité parfaite entre les deux variables (situation théorique). Production personnelle.

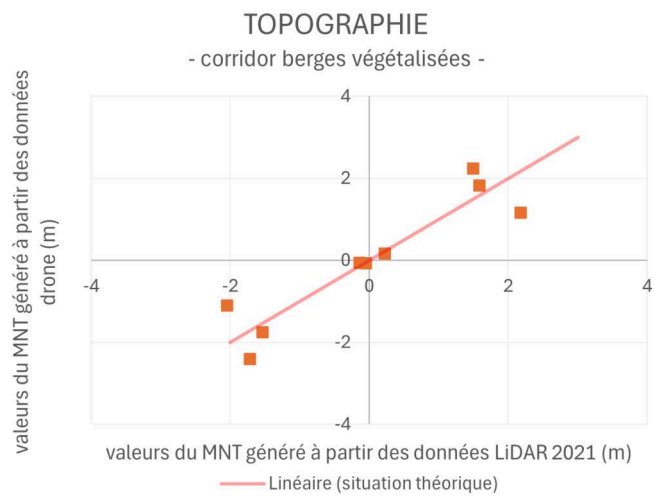


Figure 41 : Diagramme de dispersion des différences altimétriques entre trois points sélectionnés aléatoirement au sein des trois quadrats de la typologie "berges végétalisées" (A, B et C), obtenues à partir des valeurs du MNT généré à partir de données LiDAR de 2021 (axe des x) et des valeurs des MNT générés à partir des images capturées par le drone (axe des y). Ce diagramme inclut une courbe de tendance illustrant une relation de proportionnalité parfaite entre les deux variables (situation théorique). Production personnelle.

4.2. APPROCHE QUALITATIVE

4.2.1. DONNÉES DE CAPTURES

Tableau 9 : Tableau comparatif des données de captures obtenues entre l'approche minimaliste (colonne de gauche) et l'approche maximaliste (colonne de droite) pour le quadrat de la zone de jardin. (Production personnelle).

QUADRAT PATCH ZONE DE JARDIN		
DONNÉES DE CAPTURE	APPROCHE MINIMALISTE	APPROCHE MAXIMALISTE
temps de vol	2 minutes	18 minutes
nombre d'images capturées	24 images	340 images
nombre d'images alignées	24 images	302 images
nombre de points homologues	78 219 points	121 817 points
nombre de points du nuage de points	2 018 134 points	109 798 844 points
nombre de facettes du maillage 3D	6 701 400 facettes	18 619 491 facettes
surface totale inventoriée	0,25 hectare	2,5 hectares

Tableau 10 : Tableau comparatif des données de captures obtenues entre l'approche minimaliste (colonne de gauche) et l'approche maximaliste (colonne de droite) pour le quadrat de l'alignement d'arbres. Production personnelle.

QUADRAT CORRIDOR ALIGNEMENT		
DONNÉES DE CAPTURE	APPROCHE MINIMALISTE	APPROCHE MAXIMALISTE
temps de vol	2 minutes	17 minutes
nombre d'images capturées	24 images	328 images
nombre d'images alignées	24 images	322 images
nombre de points homologues	81 125 points	138 473 points
nombre de points du nuage de points	3 758 609 points	163 268 343 points
nombre de facettes du maillage 3D	9 864 792 facettes	29 892 195 facettes
surface totale inventoriée	0,25 hectare	2,5 hectares

Tableau 11 : Tableau comparatif des données de captures obtenues entre l'approche minimaliste (colonne de gauche) et l'approche maximaliste (colonne de droite) pour le quadrat du parc linéaire. Production personnelle.

QUADRAT CORRIDOR PARC LINÉAIRE		
DONNÉES DE CAPTURE	APPROCHE MINIMALISTE	APPROCHE MAXIMALISTE
temps de vol	2 minutes	15 minutes
nombre d'images capturées	24 images	265 images
nombre d'images alignées	12 images	260 images
nombre de points homologues	15 686 points	85 574 points
nombre de points du nuage de points	842 543 points	188 245 083 points
nombre de facettes du maillage 3D	2 000 549 facettes	34 327 614 facettes
surface totale inventoriée	0,25 hectare	2 hectares

Tableau 12 : Tableau comparatif du total des données de captures obtenues entre l'approche minimaliste (colonne de gauche) et l'approche maximaliste (colonne de droite) pour les trois quadrat observés. Production personnelle.

CONCLUSION		
DONNÉES DE CAPTURE	APPROCHE MINIMALISTE	APPROCHE MAXIMALISTE
temps de vol	6 minutes	50 minutes
nombre d'images capturées	72 images	933 images
nombre d'images alignées	60 images	884 images
nombre de points homologues	175 030 points	345 864 points
nombre de points du nuage de points	6 619 286 points	461 312 270 points
nombre de facettes du maillage 3D	18 566 741 facettes	82 839 300 facettes
surface totale inventoriée	0,75 hectare	7 hectares

La comparaison des données de capture obtenues par les vols de drone, entre l'approche minimaliste et l'approche maximaliste, met en évidence des différences entre les deux méthodes, aussi bien lors de la collecte des données que dans les résultats issus du traitement photogrammétrique des images capturées.

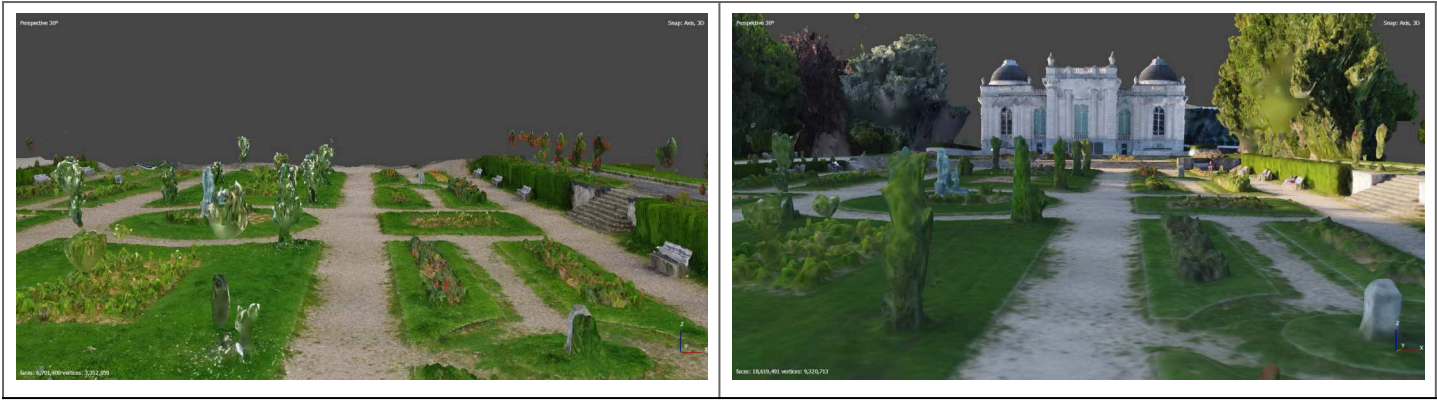
La durée de vol de l'approche maximaliste est environ 8 fois supérieure à celle de l'approche minimaliste, avec un total de photographies capturées 13 fois plus important (Tableau 12).

Au niveau des résultats obtenus à travers le traitement photogrammétrique des images capturées, la différence entre les deux méthodes est la plus marquée pour le quadrat du parc linéaire, où l'on passe de 50 % des images alignées pour l'approche minimaliste à près de 95 % pour l'approche maximaliste. Cette dernière génère plus de 5 fois plus de points homologues, 225 fois plus de points constituant le nuage de points et 17 fois plus de facettes triangulaires pour le maillage 3D (Tableau 11). En revanche, les quadrats de la zone de jardin et de l'alignement d'arbres présentent des différences moins prononcées entre les deux approches. L'approche maximaliste génère 1,6 fois plus de points homologues, 55 fois plus de points constituant le nuage de points, et 3 fois plus de facettes triangulaires pour le maillage 3D dans la zone de jardin (Tableau 9). Pour la zone d'alignement, l'approche maximaliste génère 1,7 fois plus de points homologues, 45 fois plus de points constituant le nuage de points, et 3 fois plus de facettes triangulaires pour le maillage 3D que l'approche minimaliste (Tableau 10).

4.2.2. OBSERVATIONS 3D

Tableau 13 : Tableau comparatif entre l'approche minimaliste (colonne de gauche) et l'approche maximaliste (colonne de droite), pour la reconstitution 3D du quadrat de la zone de jardin. Production personnelle.

RENDUS 3D QUADRAT ZONE DE JARDIN	
APPROCHE MINIMALISTE	APPROCHE MAXIMALISTE
	
	
	
	



La représentation 3D du quadrat de la zone de jardin, créée à partir du jeu de paramètres minimaliste, offre une reconstitution efficace de la structure paysagère considérée. Le modèle généré permet une bonne perception de l'environnement. Les zones où la reconstruction 3D est incomplète se situent principalement en périphérie du quadrat et sous la canopée de l'arbre en bordure de site (Tableau 13).

La superficie plus importante prise en compte par l'approche maximaliste permet une meilleure représentation des limites du quadrat, tandis que l'orientation de la caméra offre une meilleure visualisation des éléments verticaux tels que les arbres. Toutefois, ces paramètres avancés ne révèlent pas de différences marquées par rapport à la reconstruction minimaliste, sauf en ce qui concerne la précision des détails à petite échelle, tels que les arbustes et les rosiers (Tableau 13).

Tableau 14 : Tableau comparatif entre l'approche minimaliste (colonne de gauche) et l'approche maximaliste (colonne de droite), pour la reconstitution 3D du quadrat de l'alignement d'arbres. Production personnelle.

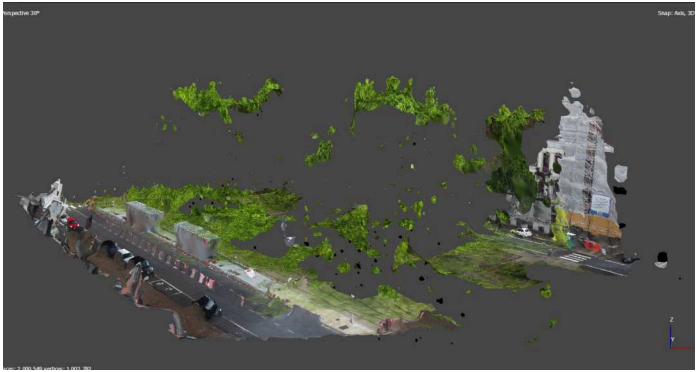

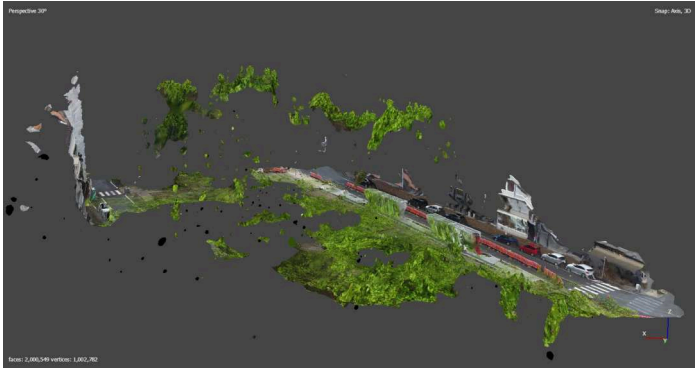

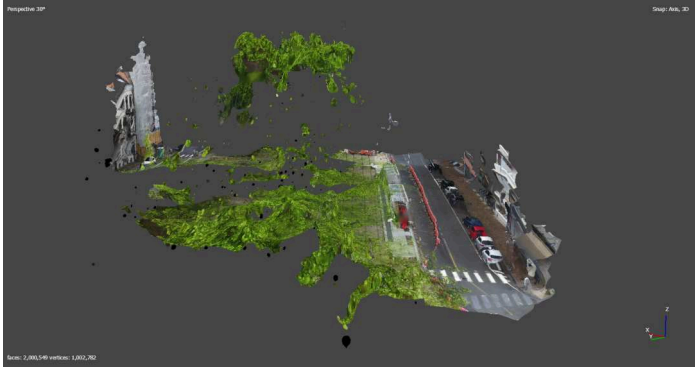

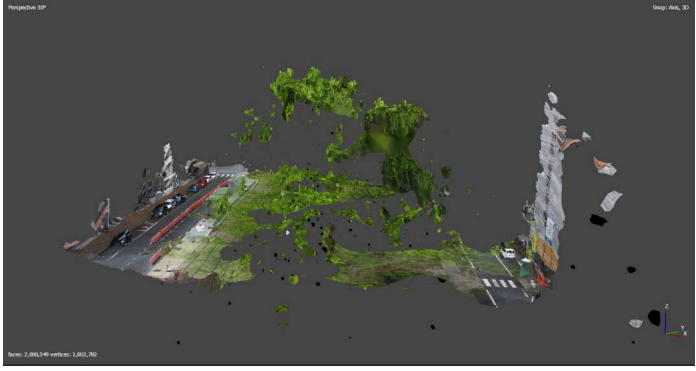

RENDUS 3D QUADRAT ALIGNEMENT D'ARBRES	
APPROCHE MINIMALISTE	APPROCHE MAXIMALISTE



Le modèle 3D généré à partir du jeu de paramètres minimaliste reconstitue de manière assez fidèle le quadrat de l'alignement d'arbres et offre une bonne perception de l'environnement. Toutefois, les limites du site présentent une reconstitution incomplète, empêchant une compréhension totale de la structure paysagère. La représentation 3D des structures verticales, telles que les façades des bâtiments et les arbres, présente des lacunes, notamment un manque important d'informations sous leur canopée. En revanche, les infrastructures minérales et les strates végétales basses sont globalement bien représentées (Tableau 14).

La comparaison avec le modèle construit à partir du jeu de paramètres maximaliste révèle une reconstitution des éléments verticaux beaucoup plus efficace, qui réduit considérablement le manque d'informations sous la couronne des arbres. Les façades des bâtiments, bien que toujours incomplètes, sont également mieux reconstituées qu'avec l'approche minimaliste. La superficie plus importante inventoriée par le vol permet une meilleure reconstruction des limites du quadrat, offrant ainsi une meilleure compréhension du contexte dans lequel il s'intègre. Enfin, la largeur des zones tampons permet d'analyser la qualité de la reconstruction 3D de nouveaux éléments, tels que la statue Albert Premier, le tunnel, ou encore les escaliers (Tableau 14).

Tableau 15 : Tableau comparatif entre l'approche minimaliste (colonne de gauche) et l'approche maximaliste (colonne de droite), pour la reconstitution 3D du quadrat du parc linéaire. Production personnelle.

RENDUS 3D QUADRAT PARC LINÉAIRE	
APPROCHE MINIMALISTE	APPROCHE MAXIMALISTE
	
	
	
	

La reconstruction 3D du quadrat du parc linéaire selon l'approche minimaliste présente de nombreuses lacunes dans la reconstitution du maillage tridimensionnel. Le modèle obtenu ne représente pas fidèlement la structure paysagère étudiée, et ne permet pas une perception efficace de l'environnement considéré. Seuls les éléments non recouverts par la canopée des arbres sont bien reconstruits, tandis que les façades ne sont pour la plupart pas représentées. Enfin, des erreurs sont observées dans la reconstruction de la cime des arbres, avec des éléments de la canopée localisés au niveau du sol (Tableau 15).

L'approche maximaliste offre un rendu nettement plus complet que celui de l'approche minimaliste. Cependant, de nombreuses d'informations manquent toujours sous la canopée des arbres. La reconstruction 3D des façades est néanmoins très efficace. Ce modèle offre une compréhension globale de la structure paysagère, mais ne permet toujours pas de percevoir l'environnement dans le détail (Tableau 15).

5. DISCUSSION

5.1. INTERPRÉTATION DES RÉSULTATS

5.1.1. APPROCHE QUANTITATIVE

L'analyse des résultats obtenus souligne l'influence du recouvrement de la canopée et de la hauteur d'arbres sur la précision des valeurs extraites des données drone.

En effet, plus le nombre d'arbres est élevé, plus les valeurs obtenues avec le drone diffèrent des valeurs de référence. Ce qui s'explique par l'orientation nadir de la caméra transportée par le drone, qui offre un point de vue perpendiculaire à la surface du sol. Lors de l'inventaire d'un environnement fortement boisé, la caméra ne détecte que les éléments supérieurs de la canopée, sans considérer les individus et autres éléments de végétation, situés sous la couronne des arbres dominants. Cela entraîne des biais dans la collecte des données, notamment pour la détection du nombre d'arbres, où des sous-estimations surviennent lorsque des individus se développent sous la canopée d'arbres plus grands, les rendant invisibles depuis la vue aérienne (Figure 34). De la même manière, plus le pourcentage de recouvrement de la strate arborée est important, plus le pourcentage de recouvrement des strates arbustives et herbacées est sous-estimé (Tableaux 3 à 8).

À l'inverse, ce paramètre de vol peut aussi entraîner des surestimations. En effet, vues du ciel, certaines grandes canopées émergentes peuvent être confondues avec des groupements d'arbres, aux couronnes plus petites, ce qui entraîne des biais dans l'identification du nombre d'arbres présents dans chaque quadrat (Figure 34).

Un pourcentage de recouvrement de la canopée important entraîne également des biais dans la génération des Modèles Numériques de Terrain issus des données drone (Figure 39). En effet, la présence d'arbres au sein des quadrats d'observation empêche d'accéder aux données de sol, qui sont obstruées par leur canopée. Face à ce manque d'informations, le logiciel de traitement photogrammétrique extrapole les triangulations des points de sol, en se basant sur les points de sol connus, qui leur sont adjacents. Ainsi, plus le recouvrement de la canopée est important, plus le manque d'informations sur les données de sol est grand, et donc plus l'extrapolation est conséquente, ce qui entraîne un plus grand risque d'erreur.

Le second constat suggère que plus la hauteur des arbres présents dans le quadrat considéré est petite, meilleurs sont les résultats. Cette constatation s'est construite à travers l'observation des cartographies produites par traitement photogrammétrique et l'analyse des résultats obtenus pour l'indicateur de la structure verticale (Figures 36 et 37). En effet, les résultats issus de la comparaison des données de hauteur d'arbres, entre les MNS générés par les données drone et le MNH généré à partir des données LiDAR, indique une augmentation considérable de l'écart-type entre ces deux valeurs et l'apparition de données aberrantes lorsque les arbres considérés dépassent les 18 mètres (Figure 36). La comparaison entre les données de hauteur d'arbres issues des MNS générés par les données drone et les valeurs obtenues sur le terrain à l'aide du vertex forestier tend à appuyer ce constat, avec une augmentation importante de l'écart-type entre les deux valeurs, lorsque la hauteur d'arbre dépasse 21,5 mètres (Figure 37).

L'apparition de biais lorsque les hauteurs d'arbres excèdent un certain seuil peut s'expliquer par la faible altitude de vol adoptée. En effet, lorsque le drone vole à une altitude trop proche de la hauteur des arbres, les angles de vue capturés deviennent très limités. Or, le principe même de la photogrammétrie repose sur la prise de vue sous différents angles pour reconstruire fidèlement un modèle considéré. Des angles de vue limités empêchent une bonne superposition entre les images successives, ce qui limite l'identification de points communs entre les photographies, et induit des biais dans les calculs de géométrie des points. Les erreurs dans la prise de données

pourraient sans doute être évitées en considérant une altitude de vol plus importante, ce qui n'est toutefois légalement pas autorisé dans le périmètre d'étude sélectionné, où la hauteur de vol est limitée à 150 pieds au-dessus du niveau du sol, soit 45,72 mètres.

La comparaison entre les données de structure verticale obtenues avec les MNS générés par les données drone, le MNH et le vertex forestier souligne un autre constat. Les données obtenues à l'aide du drone semblent apporter davantage de précision par rapport au MNH, issu des données LiDAR 2021. En effet, en prenant uniquement en compte les valeurs qui ne semblent pas avoir été biaisées par une hauteur limitée entre le drone et les arbres, soit les hauteurs d'arbres inférieures à 18 mètres pour le MNH et les hauteurs d'arbres détectées à l'aide du vertex forestier inférieures à 21,5 mètres, l'écart-type moyen entre les valeurs des MNS issus du drone et les valeurs mesurées à l'aide du vertex forestier est plus de deux fois inférieur à l'écart-type moyen qui implique les valeurs du MNH issu du LiDAR (Figures 36 et 37). L'écart-type moyen entre les valeurs des MNS issus des données drone et les valeurs du MNH issu du LiDAR s'élève à 2,15 mètres tandis que l'écart-type moyen entre les valeurs des MNS et les valeurs réelles, mesurées à l'aide du vertex forestier est de 0,99 mètre.

Ce constat peut s'expliquer par l'écart temporel qui sépare les deux relevés : les inventaires réalisés à l'aide du drone sont récents (juin 2024), tandis que les données LiDAR datent de 2021. Ce qui pourrait être la raison pour laquelle les mesures du drone tendent à surestimer les hauteurs des arbres par rapport aux valeurs du MNH, alors qu'elles les sous-estiment par rapport aux valeurs du vertex. Cette interprétation reste tout de même à nuancer, car le nombre de données collectées avec la comparaison MNS-MNH est plus de quatre fois supérieur au nombre de données collectées avec la comparaison MNS-vertex. Cela pose toutefois l'hypothèse que le drone est peut-être plus efficace que les données cartographiques disponibles en ligne pour estimer des hauteurs d'arbres.

L'analyse des résultats obtenus pour les typologies à faible recouvrement de canopée permet d'évaluer la qualité et la précision des orthomosaïques dans la distinction des strates arbustives et herbacées. En effet, lorsque ces strates ne sont pas obstruées par le feuillage des arbres, leur recouvrement est très précisément inventorié (Tableau 7). La haute résolution des orthomosaïques générées par photogrammétrie permet même de différencier les espèces d'arbres et d'identifier certaines d'entre elles, dont la forme, la couleur et le feuillage se distinguent nettement, comme le *Ginkgo Biloba*. Les résultats obtenus pour l'indicateur de richesse spécifique soulignent en effet une grande précision de l'orthomosaïque, dans l'identification du nombre d'espèces d'arbres présentes au sein de chacun des quadrats d'observation, avec un écart-type moyen de 0,75 espèce. Ces résultats montrent également que cette précision tend à décroître avec l'augmentation de la diversité des espèces au sein du quadrat (Figure 35). Il est donc important de noter que la précision de ces résultats est probablement due à l'uniformité des choix d'espèces en milieu urbain. Dans un milieu présentant une diversité d'espèces plus importante, les résultats auraient probablement été moins précis.

En conclusion, plus le milieu analysé est ouvert, avec des arbres de faible hauteur et une faible diversité d'essences, meilleure sera la précision des données extraites par traitement photogrammétrique.

Cependant, les écarts-types entre les données obtenues à l'aide du drone et la relation de proportionnalité parfaite entre les valeurs du drone et les valeurs de référence sont globalement à une échelle acceptable pour le paysagiste, à l'exception des données aberrantes obtenues à cause d'une hauteur limitée entre le drone et les arbres. En effet, la marge d'erreur observée pour les différents indicateurs considérés n'empêche pas une bonne compréhension de l'espace analysé, hormis pour les valeurs issues des Modèles Numériques de Terrain. L'écart-type moyen entre les valeurs des MNT issus de la photogrammétrie par drone et celles obtenues à partir du MNT issu des données LiDAR s'élève effectivement à 1,61 mètre, ce qui peut constituer une marge d'erreur trop importante en fonction du projet envisagé (Figure 39).

5.1.2. APPROCHE QUALITATIVE

L'analyse des résultats 3D obtenus à travers l'approche qualitative suggère que le choix du jeu de paramètres le plus pertinent à adopter pour une reconstitution 3D à l'aide d'un drone est fonction de l'environnement considéré et du niveau de précision attendu.

Pour des milieux très ouverts, l'approche minimaliste est suffisante pour permettre une bonne perception de l'espace analysé, tout en offrant un gain de temps au niveau du vol et du traitement photogrammétrique des images capturées. L'approche maximaliste n'offre que peu d'avantages supplémentaires, si ce n'est plus de précision dans les détails à petite échelle (Tableau 13).

Concernant les milieux partiellement boisés, l'approche minimaliste offre également une bonne compréhension de l'espace dans son ensemble. Cependant, l'approche maximaliste est nécessaire pour minimiser le manque d'informations visible sous la canopée des arbres (Tableau 14).

Lorsque le milieu est fortement boisé, l'approche minimaliste ne suffit pas à assurer une bonne compréhension de l'espace. L'approche maximaliste est nécessaire pour appréhender l'espace dans sa globalité. Cependant, la reconstitution photogrammétrique des espaces densément boisés avec l'approche maximaliste présente encore de nombreux biais et ne permet qu'une perception générale de l'environnement, sans grande précision (Tableau 15).

Ces différences dans les résultats s'expliquent en grande partie par la présence d'éléments verticaux dans les quadrats considérés, et par le choix d'orientation de la caméra. Comme énoncé précédemment, une orientation oblique de la caméra est plus appropriée pour les reconstructions 3D, car elle permet d'obtenir des points de vue sur des surfaces verticales, invisibles sur une image nadir (de Lame, T., 2022). Ce qui explique pourquoi les reconstructions avec la caméra orientée à 75 degrés offrent une meilleure représentation des façades et des espaces compris sous la canopée des arbres et sont donc plus adéquates pour les environnements boisés.

La trop faible différence d'altitude de vol entre l'approche minimaliste et l'approche maximaliste ne permet pas d'émettre des hypothèses quant à l'influence de la hauteur de vol sur la reconstitution 3D des quadrats étudiés.

Le choix d'une trajectoire tondeuse double et d'une superficie plus grande augmente le nombre d'images capturées, et donc le nombre de points de vue générés. Ce qui permet de contrebalancer le nombre de points de vue limités dus à la faible altitude de vol adoptée. Ceci explique la grande différence observée entre les pourcentages d'images alignées avec l'approche minimaliste et avec l'approche maximaliste, pour la représentation du parc linéaire, où les angles de vue limités empêchent une bonne superposition entre les images successives, et limitent l'identification de points communs entre les photographies de l'approche minimaliste (Tableau 11).

Le manque de précision dans la reconstitution 3D du parc linéaire, même avec une approche maximaliste, peut être attribué à l'absence d'espace dégagé autour des éléments verticaux. En effet, les arbres du quadrat sont entourés de bâtiments aux façades élevées, ce qui empêche l'acquisition de points de vue sous leur canopée, même en ajustant l'angle de la caméra.

En bref, plus l'environnement à reconstituer est boisé, plus le choix d'une approche maximaliste est préférable. À l'inverse, dans le cas d'un espace relativement ouvert, un jeu de paramètres minimaliste suffit à une perception adéquate de l'environnement étudié.

5.2. RÉPONSE AUX OBJECTIFS DE L'ÉTUDE

Les éléments de discussion précédemment énoncés semblent, pour la plupart, confirmer les hypothèses émises dans les prémices de cette étude. Pour rappel, ces hypothèses sont les suivantes :

1. La caractérisation des espaces verts urbains par drone permet de générer des données plus précises et plus actuelles que celles issues des cartographies accessibles en ligne, du Service Public de Wallonie.

La résolution des orthomosaïques issues des données drone, qui s'élève à 0,01 m/pixel, est 25 fois supérieure à celle des orthophotoplans, issus de l'imagerie satellite, égale à 0,25 m/pixel. De plus, les différentes cartographies générées à partir des images drone étant actuelles, les données qui en sont extraites semblent parfois plus exactes que les données issues des cartographies disponibles en ligne, souvent plus anciennes. Cependant, les paramètres de vol définis par la méthodologie adoptée dans cette étude n'ont pas permis de collecter des données aussi précises et fiables que celles des cartographies en ligne pour la topographie des quadrats étudiés et la hauteur des arbres mesurant plus de 18 mètres.

2. La caractérisation des espaces verts urbains par drone permet de générer des données de qualité égale à celles obtenues par les inventaires de terrain, tout en réduisant le temps nécessaire par surface échantillonnée.

Le drone permet d'obtenir des données fidèles à celles des inventaires de terrain, tout en économisant du temps, et donc de l'argent. En effet, la collecte de données à l'aide du drone a nécessité seulement 45 minutes de temps de vol pour inventorier les 18 parcelles de 0,25 hectare, et le traitement photogrammétrique des données collectées est aisé et rapide, grâce au logiciel Metashape. Au total, la collecte des données par drone a pris environ 5h15, ce qui représente un gain de temps considérable par rapport aux inventaires de terrain, qui ont nécessité deux journées complètes de travail, en mobilisant deux opérateurs.

Les données concernant le nombre d'arbres, la richesse en espèces, la hauteur des arbres, l'aire de la couronne et le taux de recouvrement des strates végétales, obtenues par traitement photogrammétrique des images capturées par le drone, sont assez fidèles aux données recueillies lors des inventaires de terrain. L'analyse par drone permet également de recueillir davantage de données que les inventaires de terrain traditionnels, notamment pour les mesures de hauteur d'arbres. En effet, l'inventaire à l'aide du vertex est limité car il nécessite que l'arbre mesuré soit suffisamment isolé pour obtenir assez de recul et une vue dégagée de l'apex. Cela rend l'utilisation du vertex impossible dans des environnements trop densément boisés.

3. Le drone permet de générer des rendus 3D qui permettent une perception claire et précise de la structure paysagère inventoriée.

Le traitement photogrammétrique des images capturées par le drone permet la reconstitution d'un modèle en trois dimensions, dont la qualité et la précision est dépendant du jeu de paramètres adopté et de l'environnement considéré. Cet élément constitue une des plus grandes plus-values de cet outil, car jusqu'alors, les modèles 3D disponibles sur les services de cartographie en ligne comme Google Maps, se limitent uniquement à des vues inclinées, et manquent de précision (Kullmann, 2018).

Il est toutefois nécessaire de mentionner les limites de cet outil. Car, bien qu'efficaces et précis pour la collecte des données de végétation, les inventaires par drone restent dépendant des conditions météorologiques et de la législation en vigueur. Ainsi, il n'est pas possible de voler à tout moment, en tout lieu, et à n'importe quelle altitude. De plus, cette méthode d'analyse requiert un ordinateur suffisamment performant pour effectuer le traitement photogrammétrique des images capturées, ainsi que l'acquisition de logiciels spécifiques, indispensables pour la capture et le traitement des données. Parmi ces logiciels, la version Elite de l'application Dronelink et l'édition professionnelle du logiciel Metashape, utilisées dans le cadre de cette étude, coûtent respectivement 119,99 € et 3499 \$.

5.3. LIMITES DE L'ÉTUDE

Les résultats obtenus dans le cadre de cette étude doivent également être interprétés en tenant compte de ses limites.

La première critique concerne la méthodologie employée pour la sélection des six typologies de végétation présentes dans le périmètre d'étude. En effet, la représentativité des différentes typologies n'est pas toujours garantie. C'est notamment le cas des zones ouvertes, qui peuvent parfois présenter un recouvrement de canopée plus important que celui observé dans les zones boisées. Le choix d'utiliser la carte du masque forestier pour différencier ces typologies s'est avéré peu pertinent, car cette cartographie manque de précision à l'échelle du milieu urbain. Il aurait été préférable de se baser sur les observations du pourcentage de canopée issues de l'orthophotoplan Été 2022 pour une meilleure représentativité des résultats.

De plus, le choix d'une typologie relève toujours d'un certain arbitraire, ces dernières sont donc souvent réductrices de la réalité (Michel & Lortic, 1992). Cela a cependant l'avantage de structurer et de simplifier les données, en regroupant les éléments ayant des caractéristiques communes.

Le nombre restreint d'unités d'observation, formées de trois quadrats pour chacune des six typologies considérées, peut également s'avérer insuffisant pour établir des relations statistiques significatives, car il n'y a pas suffisamment de données collectées pour établir des conclusions solides et fiables sur les relations entre les variables étudiées (Wavrek et al., 2023). Cela permet toutefois de dresser des tendances intéressantes et de fournir des observations préliminaires, qui suggèrent des pistes pour des recherches futures.

Certains aspects de la méthodologie de collecte de données peuvent également être critiqués. Comme le fait que les relevés effectués selon les approches minimaliste et maximaliste pour l'étude qualitative n'aient pas été réalisés le même jour. Les variations de conditions météorologiques entre les deux relevés ont donc pu influencer la qualité des résultats obtenus.

De plus, la mise en relation des valeurs d'aire de couronne avec celles du diamètre à hauteur de poitrine pour l'indicateur "aire de couronne" dans l'étude qualitative manque de précision. En effet, bien qu'une corrélation existe entre le diamètre du tronc à hauteur de poitrine et l'aire de la couronne, le coefficient de corrélation varie en fonction de l'espèce considérée (Blanchard et al., 2016). Par conséquent, la méthodologie de collecte de données pour cet indicateur est simplifiée par rapport à la réalité, et les résultats obtenus manquent donc de fiabilité, car ils reprennent l'ensemble des arbres sélectionnés, sans distinction d'espèces. À cela s'ajoute la plage de données non couvertes entre les valeurs de DBH comprises entre 70 et 143 centimètres, qui compromet également la fiabilité des résultats et des conclusions émises.

Enfin, pour évaluer l'influence de l'altitude de vol sur la qualité de la reconstruction photogrammétrique, il aurait été pertinent de comparer des vols à des hauteurs drastiquement différentes. Cependant, la réglementation en vigueur sur le site étudié limite la hauteur de vol à 150 pieds au-dessus du niveau du sol, soit 45,72 mètres. Il aurait peut-être été préférable de choisir un périmètre d'étude avec des restrictions de vol moins strictes, néanmoins, cela reflète aussi la réalité de nombreux milieux urbains.

6. PERSPECTIVES

Cette étude étant préliminaire, elle suggère des pistes pour des recherches futures.

L'approche quantitative pourrait être approfondie, en analysant la précision des valeurs issues des Modèles Numériques de Terrain générés avec des paramètres de vol maximalistes. Comme discuté précédemment, l'orientation oblique de la caméra et une trajectoire de vol en tondeuse double permettent de capturer des informations plus détaillées sur les éléments verticaux, et donc sur le terrain en général. Passer d'un jeu de paramètres minimaliste à maximaliste permet de réduire les zones non couvertes, ce qui diminue l'extrapolation des données de sols et limite ainsi les erreurs.

L'indicateur de structure verticale pourrait également être réévalué en utilisant ces paramètres de vol avancés, afin d'analyser si les valeurs de hauteur des arbres de grande dimension sont encore aberrantes.

Il pourrait aussi être intéressant de mener cette étude sur un site où les réglementations de hauteur de vol sont moins strictes, afin d'évaluer l'influence de l'altitude de vol sur la précision des valeurs et des modèles 3D obtenus, en particulier pour des environnements densément boisés.

Cette étude préliminaire pourrait également être poursuivie, en approfondissant la recherche sur la conversion des modèles 3D obtenus dans le logiciel Metashape, afin de les rendre exploitables sur des logiciels de modélisation 3D ou de Dessin Assisté par Ordinateur (DAO) utilisés par les paysagistes, tels qu'AutoCAD ou SketchUp.

Enfin, au vu de l'évolution rapide des nouvelles technologies, il est nécessaire de poursuivre régulièrement les recherches sur ces nouveaux outils. En effet, les technologies évoluent constamment, offrant de nouvelles fonctionnalités et améliorations qui peuvent augmenter la précision et l'efficacité des données collectées.

Au-delà de l'évaluation du potentiel du drone pour l'analyse des espaces verts urbains, les résultats de cette étude mettent également en lumière un manque de diversité dans les espèces d'arbres plantées et dans la structure des strates herbacées basses, dominées par la pelouse. L'adaptation des Indicateurs de Biodiversité Potentielle dans cette étude révèle l'abandon des indicateurs de "bois mort sur pied de grosse circonférence" et de "bois mort au sol de grosse circonférence". Ceci s'explique par la gestion strictement contrôlée de la végétation en milieu urbain, où les individus morts sont immédiatement évacués. Ces observations soulignent la nécessité de repenser les méthodes de plantation et de gestion de la végétation en ville. Le drone pourrait devenir un allié précieux dans cette démarche, en permettant une analyse des espaces verts urbains sous l'angle de la biodiversité.

7. CONCLUSION

Cette étude préliminaire met en lumière le potentiel d'utilisation des drones dans le domaine de l'architecture paysagère. Cet outil innovant propose une méthode rapide et efficace pour la collecte de données précises sur la structure et la composition de la végétation urbaine, à l'échelle de petites parcelles. Elle souligne également l'utilité de cette technologie dans les environnements urbains à la structure très hétérogène, souvent difficiles à cartographier, en se concentrant sur des parcelles de végétation urbaine aux typologies variées.

Bien que l'utilisation des drones soit limitée par certaines conditions météorologiques (pluie et vent), ils permettent de recueillir des données sur la structure et la composition de la végétation urbaine comparables à celles obtenues par des inventaires de terrain, offrant ainsi un gain de temps pour l'analyse des espaces verts urbains. Les drones permettent de générer des orthomosaïques et de collecter des données de hauteur d'arbres, qui sont plus actuelles, de meilleure résolution, et donc plus précises que les cartographies du Service public de Wallonie disponibles en ligne.

Ce mémoire explore également le potentiel des reconstructions 3D obtenues par traitement photogrammétrique des images capturées par drone, offrant une perception efficace de l'environnement. Il dresse le constat suivant : la qualité et la précision des reconstructions 3D sont dépendantes du jeu de paramètres adopté et de l'environnement considéré. Ainsi, plus la typologie de végétation urbaine à inventorier comporte un couvert dense, plus une orientation oblique de la caméra et une trajectoire tondeuse double seront à privilégier. Tandis qu'une orientation nadir de la caméra et une trajectoire en tondeuse simple sont suffisantes pour une représentation 3D efficace des milieux ouverts. Ces reconstructions 3D ouvrent de nouvelles perspectives pour les paysagistes, leur permettant de s'immerger dans un site sans même s'y être physiquement rendu. Cela s'avère particulièrement utile pour la prise en charge de projets à l'étranger, évitant ainsi des déplacements coûteux, mais aussi pour revisiter une nouvelle fois un site, cette fois-ci virtuellement, afin de vérifier des détails qui auraient pu être omis sur le terrain. Ces reconstructions peuvent également servir de base pour la modélisation 3D du projet envisagé.

Cependant, les réglementations appliquées à l'utilisation des drones dans certains environnements urbains impactent la qualité des reconstructions photogrammétriques, en particulier pour les espaces qui intègrent des arbres de grande dimension, en limitant l'altitude de vol. Cette contrainte n'a pas permis de générer des données de hauteur précises pour les grands arbres. De plus, cette étude n'a pas réussi à définir une méthode efficace pour générer des données topographiques précises à l'aide du drone. Toutefois, des pistes de recherche et des hypothèses d'amélioration de la méthodologie sont proposées pour améliorer les résultats obtenus à travers des recherches supplémentaires.

Cette étude démontre que le drone, en tant qu'outil technologique novateur, apporte une plus-value aux outils traditionnels d'analyse paysagère. Elle constitue un premier défrichage, servant de point de départ pour de futures potentielles recherches.

8. CONTRIBUTION DE L'ÉTUDIANTE

L'étudiante a contribué à cette étude en définissant la zone d'étude, les typologies de végétation urbaine et les indicateurs des deux approches de ce mémoire. Elle a élaboré et mis en œuvre un protocole de collecte de données photogrammétriques et de données de terrain. Elle s'est chargée de recueillir ces données, de les traiter, de les analyser et de synthétiser les résultats.

9. BIBLIOGRAPHIE

Agisoft. (s. d.). Agisoft Metashape: Agisoft Metashape. <https://www.agisoft.com/>

Aguejedad, R. (2009, 11 décembre). Etalement urbain et évaluation de son impact sur la biodiversité, de la reconstitution des trajectoires à la modélisation prospective. Application à une agglomération de taille moyenne : Rennes Métropole. [phdthesis, Université Rennes 2]. <https://theses.hal.science/tel-00553665>

Altametris. (s. d.). Comprendre la photogrammétrie. Altametris Suite. https://doc.suite.altametris.com/photogrammetry/understanding_photogrammetry/understanding_photogrammetry.html

Anquetil, V. (2010, 8 septembre). Typologie et fonctions écosystémiques de la végétation urbaine : contributions méthodologiques [travail de fin d'études, Institut National d'Horticulture et du paysage]. https://www.plante-et-cite.fr/ressource/fiche/362/vegudud_typologie_et_fonctions_eco/n:24

Aronson, M. F., Lepczyk, C. A., Evans, K. L., Goddard, M. A., Lerman, S. B., MacIvor, J. S., Nilon, C. H. et Vargo, T. (2017). Biodiversity in the city: key challenges for urban green space management. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 15(4), 189-196. <https://doi.org/10.1002/fee.1480>

Becker, M. et Picard, J.-F. (1982). *Larousse des arbres, des arbustes et des arbrisseaux de l'Europe occidentale*. Larousse.

Bergès, L., Roche, P. et Avon, C. (2010). Corridors écologiques et conservation de la biodiversité, intérêts et limites pour la mise en place de la Trame verte et bleue. *Sciences Eaux Territoires*, 3(3), 34-39.

Berni, J. A. J., Suárez, L. et Fereres, E. (2008). Remote sensing of vegetation from UAV platforms using lightweight multispectral and thermal imaging sensors, 38.

Blanchard, E., Birnbaum, P., Ibanez, T., Boutreux, T., Antin, C., Ploton, P., Vincent, G., Pouteau, R., Vandrot, H., Hequet, V., Barbier, N., Droissart, V., Sonké, B., Texier, N., Kamdem, N. G., Zebaze, D., Libalah, M. et Couteron, P. (2016). Contrasted allometries between stem diameter, crown area, and tree height in five tropical biogeographic areas. *Trees*, 30(6), 1953-1968. <https://doi.org/10.1007/s00468-016-1424-3>

Centre canadien de télédétection. (2007, 25 septembre). Notions fondamentales de télédétection. Natural Resources Canada. Ressources naturelles Canada. <https://ressources-naturelles.canada.ca/cartes-outils-et-publications/imagerie-satellitaire-donnees-delevation-et-photos-aeriennes/tutoriel-notions-fondamentales-teledetection/9310>

Chang, Q., Liu, X., Wu, J. et He, P. (2014). MSPA-Based Urban Green Infrastructure Planning and Management Approach for Urban Sustainability: Case Study of Longgang in China. *Journal of Urban Planning and Development*, 141, A5014006. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)UP.1943-5444.0000247](https://doi.org/10.1061/(ASCE)UP.1943-5444.0000247)

Clark, D. B. et Clark, D. A. (2000). Landscape-scale variation in forest structure and biomass in a tropical rain forest. *Forest Ecology and Management*, 137(1), 185-198. [https://doi.org/10.1016/S0378-1127\(99\)00327-8](https://doi.org/10.1016/S0378-1127(99)00327-8)

Climate Data. (s. d.). Climat Liège: Pluviométrie et Température moyenne Liège, diagramme ombrothermique pour Liège. [climate-data.org. https://fr.climate-data.org/europe/belgique/wallonie/liege-6396/](https://fr.climate-data.org/europe/belgique/wallonie/liege-6396/)

- Cureton, P. (2017). *Stratégies de représentation du paysage: Techniques numériques et analogiques* (1^{re} éd.). Routledge. <https://doi.org/10.4324/9781315673936>
- de Lame, T. (2022). Étude automatisée de la qualité d'une reconstruction photogrammétrique selon les prises d'image [Université de Liège - Gembloux Agro-Bio Tech]. <https://matheo.uliege.be/handle/2268.2/15812>
- Département de l'Urbanisme de la Ville de Liège. (2023, juillet). Atlas de la Ville de Liège. <https://www.liege.be/fr/vie-communale/services-communaux/urbanisme/publications/atlas-de-liege>
- Egels, Y. (2011). La photogrammétrie, principes généraux et terminologie. Collection EDYTEM. Cahiers de géographie, 12(1), 41-50. <https://doi.org/10.3406/edyte.2011.1176>
- Eisenbeiß, H. (2009). UAV photogrammetry [dissertation]. University of Technology Dresden.
- Forman, R. T. T. (1995). Some general principles of landscape and regional ecology. *Landscape Ecology*, 10(3), 133-142. <https://doi.org/10.1007/BF00133027>
- Géoportail de la Wallonie. (s. d.-a). Masque forestier [le site de l'information géographique wallonne]. Walonmap - Géoportail de la Wallonie. <http://geoportail.wallonie.be/catalogue/2a5ef10f-36f8-4bb0-9188-781ac089b7ce.html>
- Géoportail de la Wallonie. (s. d.-b). Nuage de points LIDAR 2021-2022 [le site de l'information géographique wallonne]. Walonmap - Géoportail de la Wallonie. <http://geoportail.wallonie.be/catalogue/ab14b035-c9b0-4c79-a2b6-36811fca96a1.html>
- Géoportail de la Wallonie. (s. d.-c). Occupation du sol en Wallonie - WALOUS 2018 [le site de l'information géographique wallonne]. Walonmap - Géoportail de la Wallonie. <http://geoportail.wallonie.be/catalogue/a0ad23a1-1845-4bd5-8c2f-0f62d3f1ec75.html>
- Géoportail de la Wallonie. (s. d.-d). Relief de la Wallonie – Modèle Numérique de Surface (MNS) 2018 - Photogrammétrie [le site de l'information géographique wallonne]. Walonmap - Géoportail de la Wallonie. <http://geoportail.wallonie.be/catalogue/8aab6934-ed04-4272-85ff-82d02096e0c7.html>
- Géoportail de la Wallonie. (s. d.-e). Relief de la Wallonie - Modèle Numérique de Terrain (MNT) 2021-2022 [le site de l'information géographique wallonne]. Walonmap - Géoportail de la Wallonie. <http://geoportail.wallonie.be/catalogue/a004e570-99d6-4fe5-b83d-49b774409278.html>
- Groupe de la Banque Mondiale. (2022). World Bank Open Data. World Bank Open Data. <https://data.worldbank.org>
- He, T., Yang, Y., Shi, Y., Liang, X., Fu, S., Xie, G., Liu, B. et Liu, Y. (2022). Quantifying spatial distribution of interrill and rill erosion in a loess at different slopes using structure from motion (SfM) photogrammetry. *International Soil and Water Conservation Research*, 10(3), 393-406. <https://doi.org/10.1016/j.iswcr.2022.01.001>
- IGN Institut. (2021, 13 octobre). La photogrammétrie. <https://www.ign.fr/institut/kiosque/la-photogrammetrie>
- Jacobs, L. (2023, 24 août). Potentiel du drone low-cost par rapport au LiDAR dans l'évaluation de la diversité structurale des forêts tempérées wallonnes [travail de fin d'études, Université de Liège - Gembloux Agro-Bio Tech]. <https://matheo.uliege.be/handle/2268.2/18099>
- Jim, C. Y. (2004). Green-space preservation and allocation for sustainable greening of compact cities. *Cities*, 21(4), 311-320. <https://doi.org/10.1016/j.cities.2004.04.004>

- Jin, R. et Xiao, X. (2023, 27 octobre). Drone Photogrammetry-Based Meticulous Monitoring and Management of Urban Park Green Space. <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-3489925/v2>
- Joris, F. et Marchesani, F. (2009, avril). Parc de la Boverie à Liège. Connaître la Wallonie. <https://connaitrelawallonie.wallonie.be/fr/culture-et-patrimoine/patrimoine/parc-de-la-boverie-liege>
- Kasser, M., Delley, N. et Cretegy, S. (2019). Comparaison de MNT à haute résolution issus de techniques laser et photogrammétriques, (158).
- Kullmann, K. (2018). The drone's eye: applications and implications for landscape architecture. *Landscape Research*, 43(7), 906-921. <https://doi.org/10.1080/01426397.2017.1386777>
- Larrieu, L. et Gonin, P. (2008). L'indice de biodiversité potentielle (IBP) : une méthode simple et rapide pour évaluer la biodiversité potentielle des peuplements forestiers. *Revue forestière française*, 60(6), 727-748. <https://doi.org/10.4267/2042/28373>
- Mathys, N., Puech, C., Jacome, A., Bailly, J.-S., Rey, F., Thommeret, N. et Kaiser, B. (2009). MNT à très haute résolution dans les modelés fortement disséqués : des données aux tests d'application. *Géomorphologie: relief, processus, environnement*, 2. <https://doi.org/10.4000/geomorphologie.7589>
- Mbock, G., Tjomb, D., Mbevo Fendoung, P. et Akamba, G. Y. (2018). Utilisation des SIG mobiles et l'outil vertex dans la gestion forestière : une application dans la forêt de l'école nationale des eaux et forêts de Mbalmayo. *Revue Internationale de Géomatique, Aménagement et Gestion des Ressources*, 3. <https://orbi.uliege.be/handle/2268/238400>
- Michel, A. et Lortic, B. (1992). Typologies urbaines et télédétection satellitaire. La notion de zones en milieu urbain. *L'Espace géographique*, 21(2), 167-178.
- Michez, A. et Lejeune, P. (2020, septembre). MetaShape cours introductif : Création d'un modèle 3D terrestre. Université de Liège - Gembloux Agro-Bio Tech.
- Milligan, B. (2019). Making terrains: Surveying, drones and media ecology. *Journal of Landscape Architecture*, 14(2), 20-35. <https://doi.org/10.1080/18626033.2019.1673565>
- Nowak, D. J., Hirabayashi, S., Doyle, M., McGovern, M. et Pasher, J. (2018). Air pollution removal by urban forests in Canada and its effect on air quality and human health. *Urban Forestry & Urban Greening*, 29, 40-48. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2017.10.019>
- Nys, M. (s. d.). Jardin à la française. Encyclopédie d'Histoire Numérique de l'Europe. <https://ehne.fr/fr/encyclopedie/th%C3%A9matiques/les-arts-en-europe/espace-ville-et-territoire/le-jardin-%C3%A0-la-fran%C3%A7aise>
- ONU, Nations Unies. (s. d.). Plus de la moitié de la population mondiale vit désormais dans des villes - ONU | Nations Unies. United Nations. <https://www.un.org/fr/desa/world-urbanization-prospects>
- Park, J., Kim, J.-H., Lee, D. K., Park, C. Y. et Jeong, S. G. (2017). The influence of small green space type and structure at the street level on urban heat island mitigation. *Urban Forestry & Urban Greening*, 21, 203-212. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2016.12.005>
- Philippot, J. (2024, avril). Les Berges de la Dérivation [projet de fin d'études, Université de Liège - Gembloux AgroBio Tech]. <https://www.calameo.com/read/007643651c652d8bb1bac>

Pu, R. et Landry, S. (2012). A comparative analysis of high spatial resolution IKONOS and WorldView-2 imagery for mapping urban tree species. *Remote Sensing of Environment*, 124, 516-533.
<https://doi.org/10.1016/j.rse.2012.06.011>

Remondino, F. et Fraser, C. (2006). Digital camera calibration methods: Considerations and comparisons. *ISPRS Commission V Symposium « Image Engineering and Vision Metrology »* (vol. XXXVI, p. 266-272).
<https://doi.org/10.3929/ethz-b-000158067>

Selmi, W., Weber, C., Rivière, E., Blond, N., Mehdi, L. et Nowak, D. (2016). Air pollution removal by trees in public green spaces in Strasbourg city, France. *Urban Forestry & Urban Greening*, 17, 192-201.
<https://doi.org/10.1016/j.ufug.2016.04.010>

Shahtahmassebi, A. R., Li, C., Fan, Y., Wu, Y., Gan, M., Wang, K., Malik, A. et Blackburn, G. A. (2020). Remote sensing of urban green spaces: A review. *Urban Forestry & Urban Greening*, 57, 126946.
<https://doi.org/10.1016/j.ufug.2020.126946>

Skeyes. (s. d.-a). À propos de nous. <https://www.skeyes.be/fr/a-propos-de-nous/>

Skeyes. (s. d.-b). Drones & Aerial Activities - Guide de démarrage rapide.
<https://www.skeyes.be/fr/services/drone-home-page/you-and-your-drone/drone-service-application/dsa-quickstart-guide/>

Skeyes et FPS mobility and transport beglian civil aviation authority. (s. d.). Carte de localisation des Zones Géographiques des UAS. Skeyes - Guide des drones. <https://map.droneguide.be/>

Solecki, W. D. et Welch, J. M. (1995). Urban parks: green spaces or green walls? *Landscape and Urban Planning*, 32(2), 93-106. [https://doi.org/10.1016/0169-2046\(94\)00193-7](https://doi.org/10.1016/0169-2046(94)00193-7)

Song, P., Kim, G., Mayer, A., He, R. et Tian, G. (2020). Assessing the Ecosystem Services of Various Types of Urban Green Spaces Based on i-Tree Eco. *Sustainability*, 12(4), 1630. <https://doi.org/10.3390/su12041630>

SPW. (2018, 16 janvier). Zones bioclimatiques - État de l'environnement wallon. Etat de l'environnement wallon. http://etat.environnement.wallonie.be/cms/render/live/fr_BE/sites/eeew/contents/indicatorsheets/PHYS 6.html

Stahlschmidt, P., Swaffield, S., Primdahl, J. et Nellesmann, V. (2017). Analyse du paysage: Étudier les potentiels de l'espace et du lieu (1^{re} éd.). Routledge. <https://doi.org/10.4324/9781315682792>

Statbel. (2023). Liège | Statbel. <https://statbel.fgov.be/fr/commune/liege#dashboard1>

Suran, N. A., Shafri, H. Z. M., Shaharum, N. S. N., Radzali, N. a. W. M. et Kumar, V. (2019). UAV-based hyperspectral data analysis for urban area mapping. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XLII-4-W16, 621-626.
<https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-4-W16-621-2019>

Tan, C. L. Y., Chang, C.-C., Nghiem, L. T. P., Zhang, Y., Oh, R. R. Y., Shanahan, D. F., Lin, B. B., Gaston, K. J., Fuller, R. A. et Carrasco, L. R. (2021). The right mix: Residential urban green-blue space combinations are correlated with physical exercise in a tropical city-state. *Urban Forestry & Urban Greening*, 57, 126947.
<https://doi.org/10.1016/j.ufug.2020.126947>

Ville de Liège. (2015). Réaménagement des quais de Meuse [document]. Ville de Liège.
<https://www.liege.be/fr/vie-communale/projet-de-ville/grands-projets/realisations/reamenagement-des-quais-de-meuse>

Ville de Liège. (2023). Plan Nature [document]. Ville de Liège.

<https://www.liege.be/fr/vie-communale/services-communaux/environnement/plan-nature/plan-nature>

Wavrek, M. T., Carr, E., Jean-Philippe, S. et McKinney, M. L. (2023). Drone remote sensing in urban forest management: A case study. *Urban Forestry & Urban Greening*, 86, 127978.

<https://doi.org/10.1016/j.ufug.2023.127978>

Westphal, K. (2015, 25 juin). Rapport sur la dimension urbaine des politiques européennes | A8-0218/2015 | Parlement européen. https://www.europarl.europa.eu/doceo/document/A-8-2015-0218_FR.html

Zhang, K., Tang, X., Zhao, Y., Huang, B., Huang, L., Liu, M., Luo, E., Li, Y., Jiang, T., Zhang, L., Wang, Y. et Wan, J. (2022). Differing perceptions of the youth and the elderly regarding cultural ecosystem services in urban parks: An exploration of the tour experience. *Science of The Total Environment*, 821, 153388.

<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.153388>

Zolkos, S. G., Goetz, S. J. et Dubayah, R. (2013). A meta-analysis of terrestrial aboveground biomass estimation using lidar remote sensing. *Remote Sensing of Environment*, 128, 289-298.

<https://doi.org/10.1016/j.rse.2012.10.017>

TABLE DES ANNEXES

<u>ANNEXE 1</u> : Tutoriel détaillé qui présente les étapes à suivre pour la réalisation d'un Modèle Numérique de Surface (MNS), d'un Modèle Numérique de Terrain (MNT), d'une orthomosaïque et d'un modèle 3D texturé à partir d'images capturées à l'aide d'un drone, à l'aide du logiciel Agisoft Metashape Professional ; 64 bit, ainsi que leur exportation dans un format utilisable dans des logiciels SIG.	1
<u>ANNEXE 2</u> : Tutoriel détaillé qui présente les étapes à suivre pour la création d'un plan de vol sur l'application Dronelink LLC. ; v.4.9.2, permettant ensuite la réalisation d'un vol automatisé sur le terrain.	9
<u>ANNEXE 3</u> : Tableau récapitulatif des noms de quadrats analysés dans le cadre de l'approche quantitative de cette étude, et de la typologie de végétation urbaine à laquelle ils appartiennent.	13
<u>ANNEXE 4</u> : Carte d'occupation du sol en Wallonie - WALOUS 2018, au sein du périmètre sélectionné.	14
<u>ANNEXE 5</u> : Carte du masque forestier, au sein de périmètre sélectionné.	14
<u>ANNEXE 6</u> : Carte des plans de vol réalisés sur le logiciel Dronelink pour l'inventaire de l'étude quantitative et pour l'inventaire de l'étude qualitative, selon une approche minimaliste.	15
<u>ANNEXE 7</u> : Carte des plans de vol réalisés sur le logiciel Dronelink pour l'inventaire de l'étude qualitative, selon une approche maximaliste.	18
<u>ANNEXE 8</u> : Ensemble des cartographies et des données générées pour le quadrat A, lors de l'étude quantitative.	19
<u>ANNEXE 9</u> : Ensemble des cartographies et des données générées pour le quadrat B, lors de l'étude quantitative.	21
<u>ANNEXE 10</u> : Ensemble des cartographies et des données générées pour le quadrat C, lors de l'étude quantitative.	23
<u>ANNEXE 11</u> : Ensemble des cartographies et des données générées pour le quadrat D, lors de l'étude quantitative.	25
<u>ANNEXE 12</u> : Ensemble des cartographies et des données générées pour le quadrat E, lors de l'étude quantitative.	27
<u>ANNEXE 13</u> : Ensemble des cartographies et des données générées pour le quadrat F, lors de l'étude quantitative.	29
<u>ANNEXE 14</u> : Ensemble des cartographies et des données générées pour le quadrat G, lors de l'étude quantitative.	31
<u>ANNEXE 15</u> : Ensemble des cartographies et des données générées pour le quadrat H, lors de l'étude quantitative.	33
<u>ANNEXE 16</u> : Ensemble des cartographies et des données générées pour le quadrat I, lors de l'étude quantitative.	35
<u>ANNEXE 17</u> : Ensemble des cartographies et des données générées pour le quadrat J, lors de l'étude quantitative.	37

<u>ANNEXE 18</u> :	Ensemble des cartographies et des données générées pour le quadrat K, lors de l'étude quantitative.	39
<u>ANNEXE 19</u> :	Ensemble des cartographies et des données générées pour le quadrat L, lors de l'étude quantitative.	41
<u>ANNEXE 20</u> :	Ensemble des cartographies et des données générées pour le quadrat M, lors de l'étude quantitative.	43
<u>ANNEXE 21</u> :	Ensemble des cartographies et des données générées pour le quadrat N, lors de l'étude quantitative.	44
<u>ANNEXE 22</u> :	Ensemble des cartographies et des données générées pour le quadrat O, lors de l'étude quantitative.	45
<u>ANNEXE 23</u> :	Ensemble des cartographies et des données générées pour le quadrat P, lors de l'étude quantitative.	47
<u>ANNEXE 24</u> :	Ensemble des cartographies et des données générées pour le quadrat Q, lors de l'étude quantitative.	49
<u>ANNEXE 25</u> :	Ensemble des cartographies et des données générées pour le quadrat R, lors de l'étude quantitative.	51
<u>ANNEXE 26</u> :	Ensemble des résultats générés pour l'indicateur du nombre d'arbres dans le cadre de l'étude quantitative .	53
<u>ANNEXE 27</u> :	Ensemble des résultats générés pour l'indicateur de richesse en espèces d'arbres dans le cadre de l'étude quantitative .	55
<u>ANNEXE 28</u> :	Ensemble des résultats générés pour l'indicateur de structure verticale de la strate arborée dans le cadre de l'étude quantitative .	57
<u>ANNEXE 29</u> :	Ensemble des résultats générés pour l'indicateur d'aire de la couronne dans le cadre de l'étude quantitative .	61
<u>ANNEXE 30</u> :	Ensemble des résultats générés pour l'indicateur de recouvrement des strates végétales dans le cadre de l'étude quantitative .	63
<u>ANNEXE 31</u> :	Ensemble des résultats générés pour l'indicateur de recouvrement des strates végétales dans le cadre de l'étude quantitative .	65

ANNEXES

ANNEXE 1 : Tutoriel détaillé qui présente les étapes à suivre pour la réalisation d'un Modèle Numérique de Surface (MNS), d'un Modèle Numérique de Terrain (MNT), d'une orthomosaïque et d'un modèle 3D texturé à partir d'images capturées à l'aide d'un drone, à l'aide du logiciel Agisoft Metashape Professional ; 64 bit, ainsi que leur exportation dans un format utilisable dans des logiciels SIG. Production personnelle réalisée à l'aide du cours "MetaShape cours introductif : Création d'un modèle 3D terrestre" (Michez & Lejeune, 2020).

L'objet modélisé est le quadrat O de cette étude, appartenant à la typologie des zones de jardin, d'une superficie de 0,25 hectare. Les données utilisées pour cet exercice sont constituées d'un set de 24 photographies qui couvre l'objet d'intérêt avec un recouvrement de 80%, un angle de caméra de 90 degrés et une trajectoire de vol en tondeuse simple. L'altitude de vol adoptée est de 40 mètres au-dessus du niveau du sol, par rapport à la zone de décollage.

La méthode suivante est transposable à tout type de site et de superficie. Elle est également adaptée aussi bien à des paramètres de vol minimalistes, que maximalistes.

étape 1 : chargement des images

- Ouvrir une session Agisoft Metashape
- Pour charger les images dans un projet, utiliser la commande "Traitements" → "Ajouter des photos ..."
- Sélectionner l'ensemble des images qui couvrent la zone à modéliser et cliquer sur ouvrir.
- Une fois les images chargées, enregistrer le projet comme suite : "Fichier" → "Enregistrer sous ...".

étape 2 : aligner les images

- Appliquer la commande "Traitements" → "Aligner des photos ..."
- Choisir les valeurs "La plus haute" et "Estimée" pour les paramètres "Précision" et "Présélection générique".
- Dans l'onglet "Avancé", les options par défaut sont à maintenir : 1,000 et 0 respectivement pour les "Limites de points clefs par Mpx" et les "Limites de points de liaison". Décocher l'option "Ajustement progressif du modèle de la caméra".

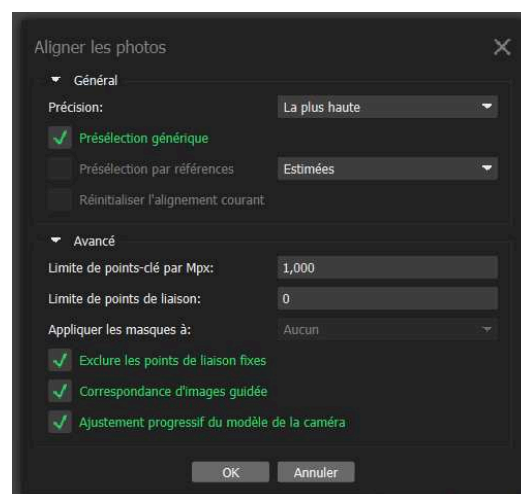


Figure 1.1. : Sélection des paramètres pour l'alignement des photos.

- Le résultat de l'alignement d'images est un nuage de points léger, qui correspond aux points caractéristiques ayant pu être associés à plusieurs images. Il peut être visualisé en trois dimensions depuis la fenêtre **"Modèle"**.
- Dans l'onglet **"Espace de Travail"**, le nombre d'images que le logiciel a pu aligner est affiché. Un objet **"Points de liaison"** a également été ajouté.

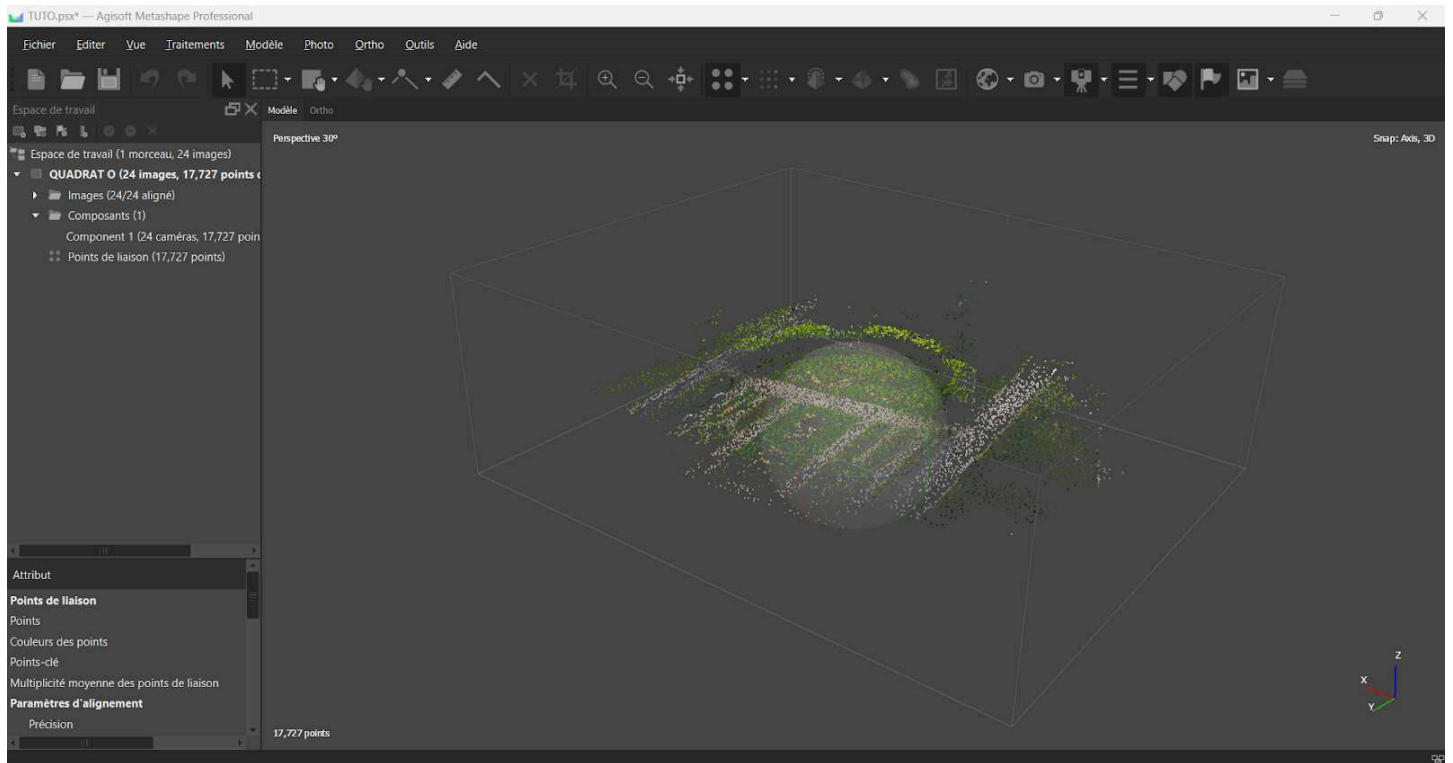


Figure 1.2. : Affichage du nuage de points léger

étape 3 : génération d'un nuage de points dense

- Contrairement au nuage de points léger, qui représente uniquement les points caractéristiques ayant pu être associés à plusieurs images, le nuage de points dense est calculé sur base de l'ensemble des pixels des images ayant pu être orientées. Le résultat est donc beaucoup plus riche et va cette fois permettre une reconstruction fine de la scène analysée.
- Appliquer la commande **"Traitements" → "Construire le Nuage de points ..."**
- Choisir la valeur **"Haute"** pour le paramètre **"Qualité"** pour une approche minimaliste, et la valeur **"Ultra haute"** pour une approche maximaliste.
- Dans l'onglet **"Avancé"**, régler le paramètre **"Filtrage de la profondeur"** sur **"Agressif"**. Et cocher l'option **"Calculer les couleurs des points"**.

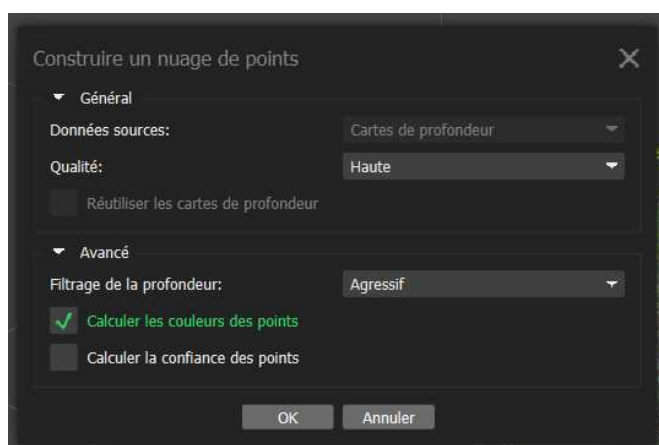


Figure 1.3. : Sélection des paramètres pour la construction d'un nuage de points selon une approche minimaliste.

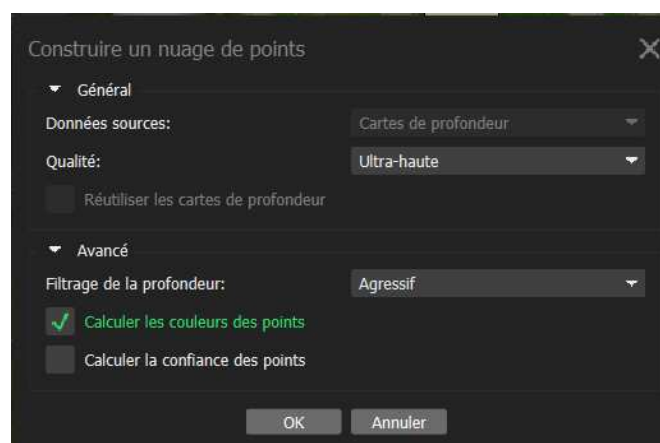


Figure 1.4. : Sélection des paramètres pour la construction d'un nuage de points selon une approche maximaliste.

- Le résultat est visualisable en sélectionnant "Nuage de points" dans l'onglet "Espace de Travail". Le nombre points du nuage dense passe ainsi de 17 727 points pour le nuage léger à plus de 8,5 millions pour une qualité haute.

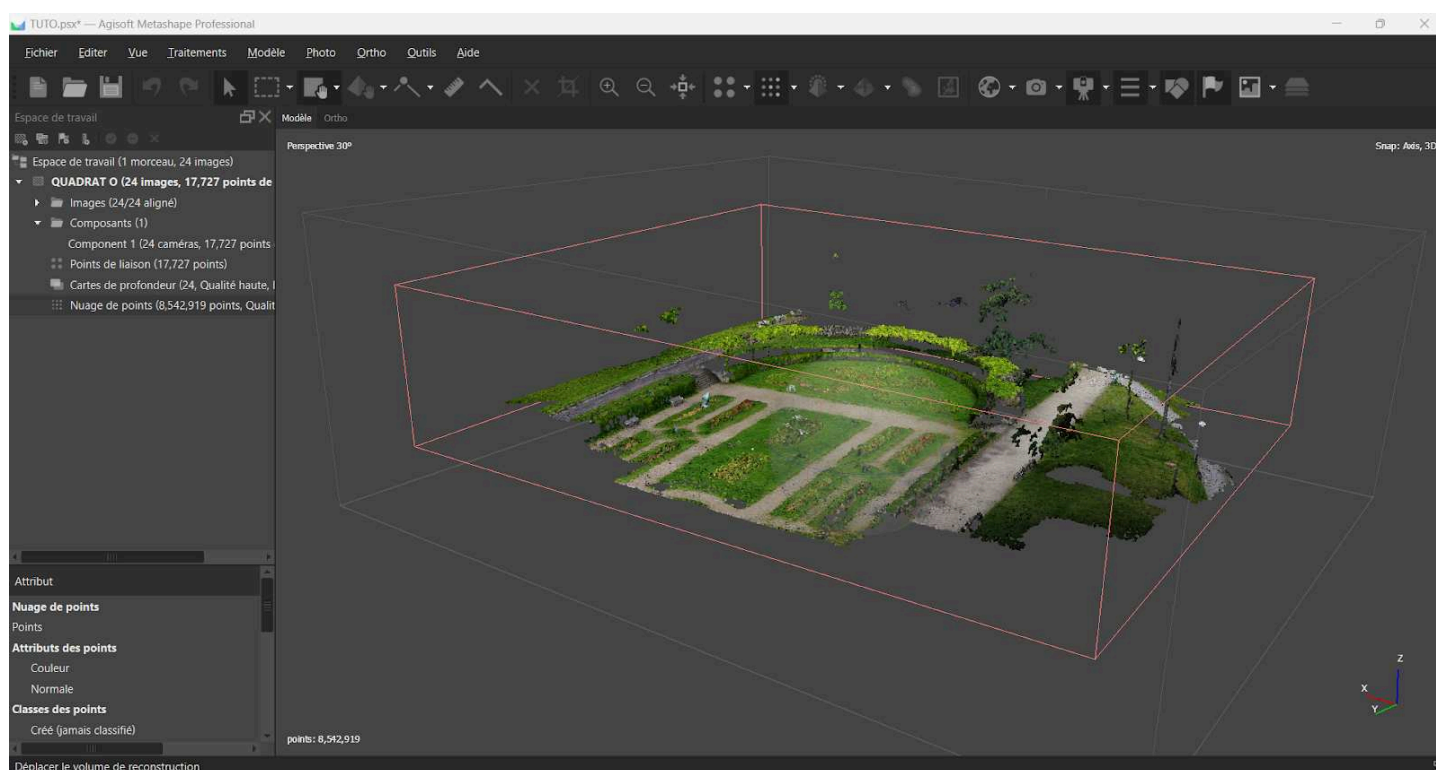


Figure 1.5. : Affichage du nuage de points dense.

étape 4 : génération d'un Modèle Numérique de Surface

- Appliquer la commande "Traitements" → "Construire un MNE ..." qui est l'abréviation du Modèle Numérique d'Élévation, qui correspond au Modèle Numérique de surface.
- Régler la projection en Lambert Belge 72 (EPSG:31370) pour le paramètre "Projection géographique".
- Conserver les "Données source" sur le "Nuage de points" et maintenir les autres options par défaut.

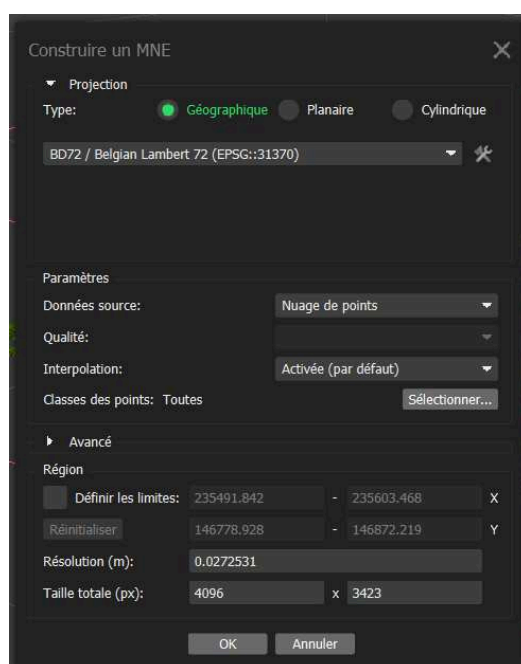


Figure 1.6. : Sélection des paramètres pour la construction d'un MNS.

- Le résultat est visualisable en sélectionnant "MNE" dans l'onglet "Espace de Travail".
- Le Modèle Numérique de Surface peut ensuite être exporté au format TIFF en appliquant la commande "Fichier" → "Exporter" → "Exporter le MNE ..." pour pouvoir être utilisable dans des logiciels SIG.

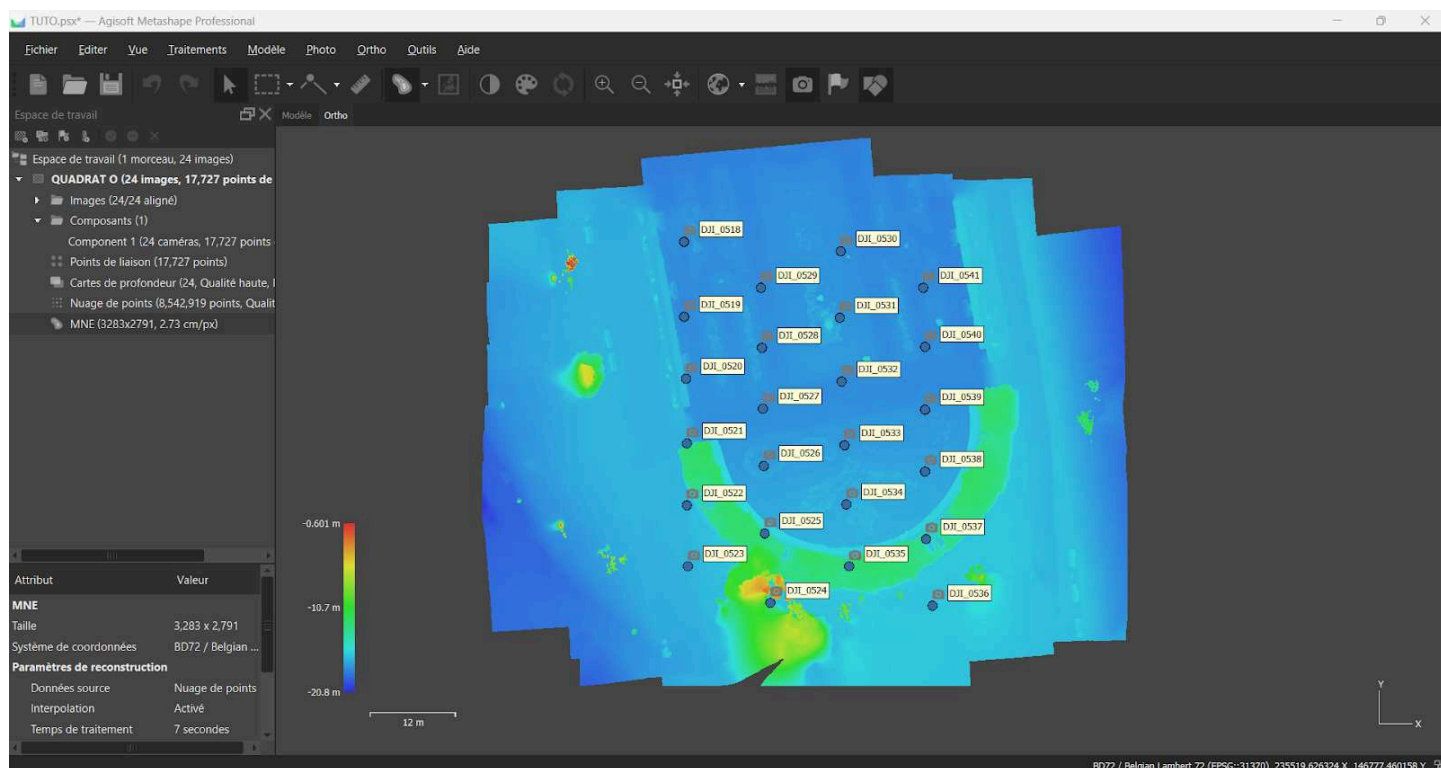


Figure 1.7. : Affichage du Modèle Numérique de Surface.

étape 5 : génération d'une orthomosaïque

- Appliquer la commande "Traitements" → "Construire une Orthomosaïque ...".
- Conserver les "Données source" sur le "MNE" et maintenir les autres options par défaut.

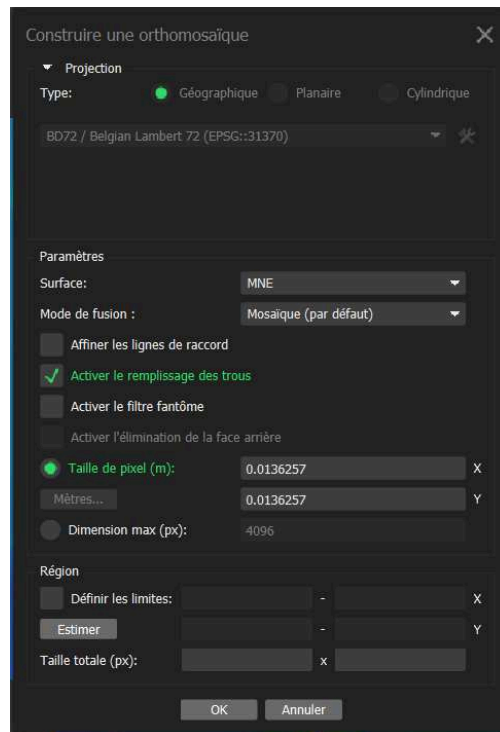


Figure 1.8. : Sélection des paramètres pour la construction d'une orthomosaïque.

- Le résultat est visualisable en sélectionnant "Orthomosaïque" dans l'onglet "Espace de Travail".
- L'orthomosaïque peut ensuite être exportée au format TIFF en appliquant la commande "Fichier" → "Exporter" → "Exporter l'orthomosaïque ..." pour pouvoir être utilisable dans des logiciels SIG.

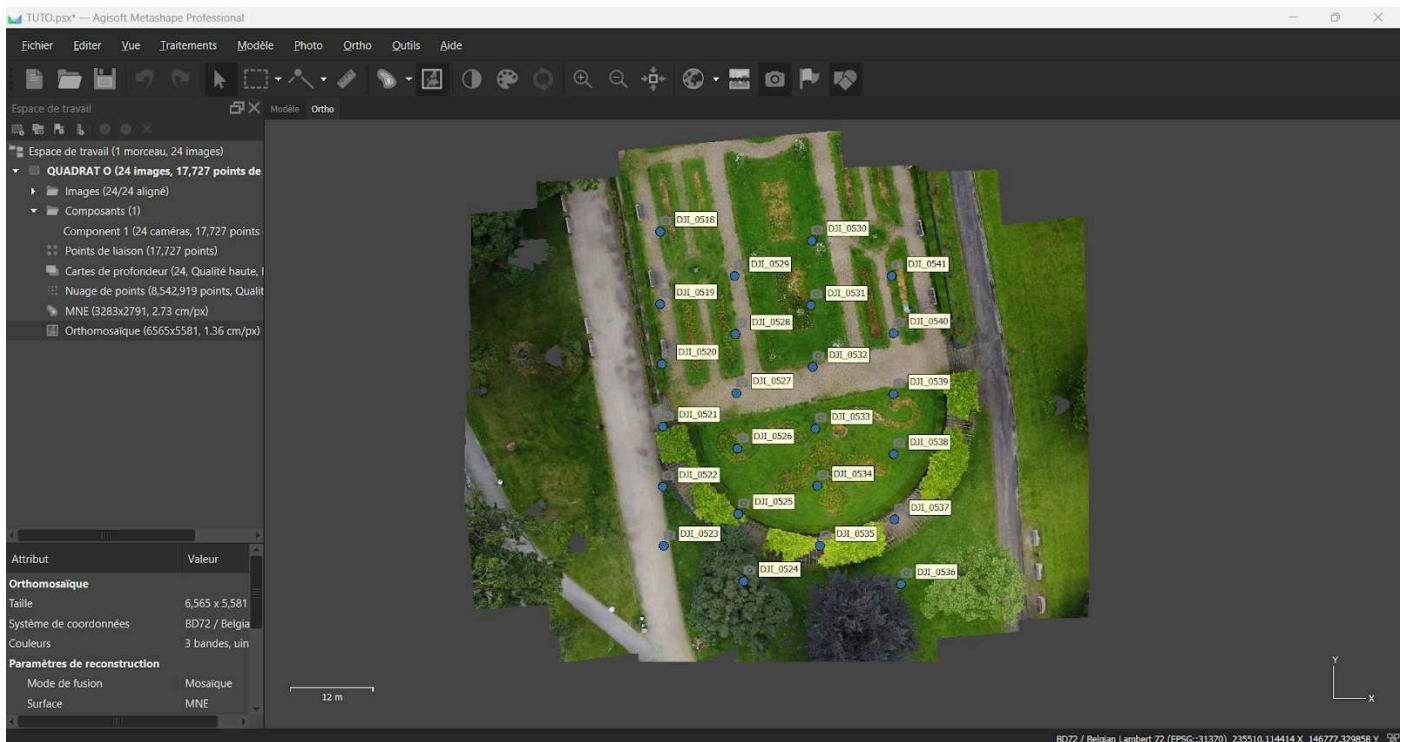


Figure 1.9. : Affichage de l'orthomosaïque.

étape 6 : génération d'un Modèle Numérique de Terrain

- Pour construire un Modèle Numérique de Terrain, il est d'abord nécessaire de classer les points de sol, à travers la commande "Outils" → "Nuage de points" → "Classifier les points de terrain ..."

- Les paramètres par défaut sont à conserver.
- Appliquer ensuite à nouveau la commande **“Traitements” → “Construire un MNE ...”** mais cette fois, en sélectionnant les classes de points **“Terrain”** et **“Points Bas (bruit)”**
- Régler la projection en Lambert Belge 72 (EPSG:31370) pour le paramètre **“Projection géographique”**.
- Conserver les **“Données source”** sur le **“Nuage de points”** et maintenir les autres options par défaut.

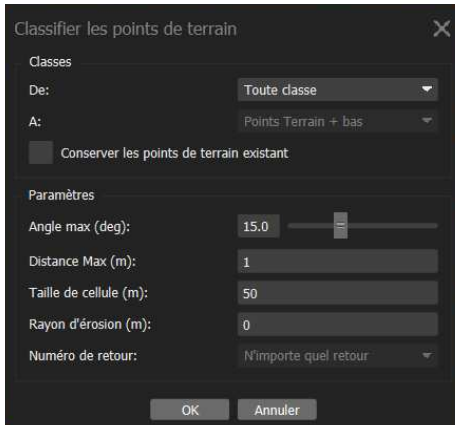


Figure 1.10. : Sélection des paramètres pour la classification des points de terrain.

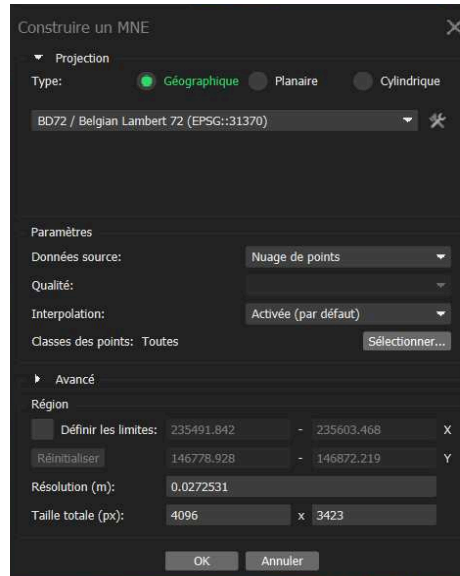


Figure 1.11a. : Sélection des paramètres pour la construction d'un MNT.

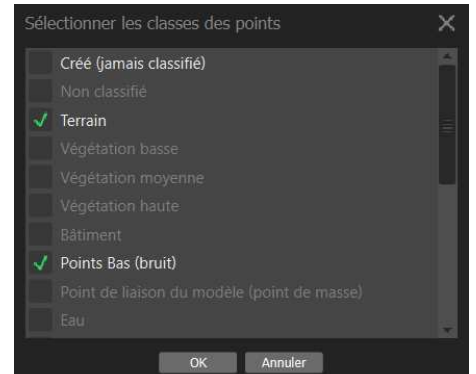


Figure 1.11b. : Sélection des paramètres pour la construction d'un MNT.

- Le résultat est visualisable en sélectionnant **“MNE”** dans l'onglet **“Espace de Travail”**.
- Le Modèle Numérique de Terrain peut ensuite être exporté au format TIFF en appliquant la commande **“Fichier” → “Exporter” → “Exporter le MNE ...”** pour pouvoir être utilisable dans des logiciels SIG.

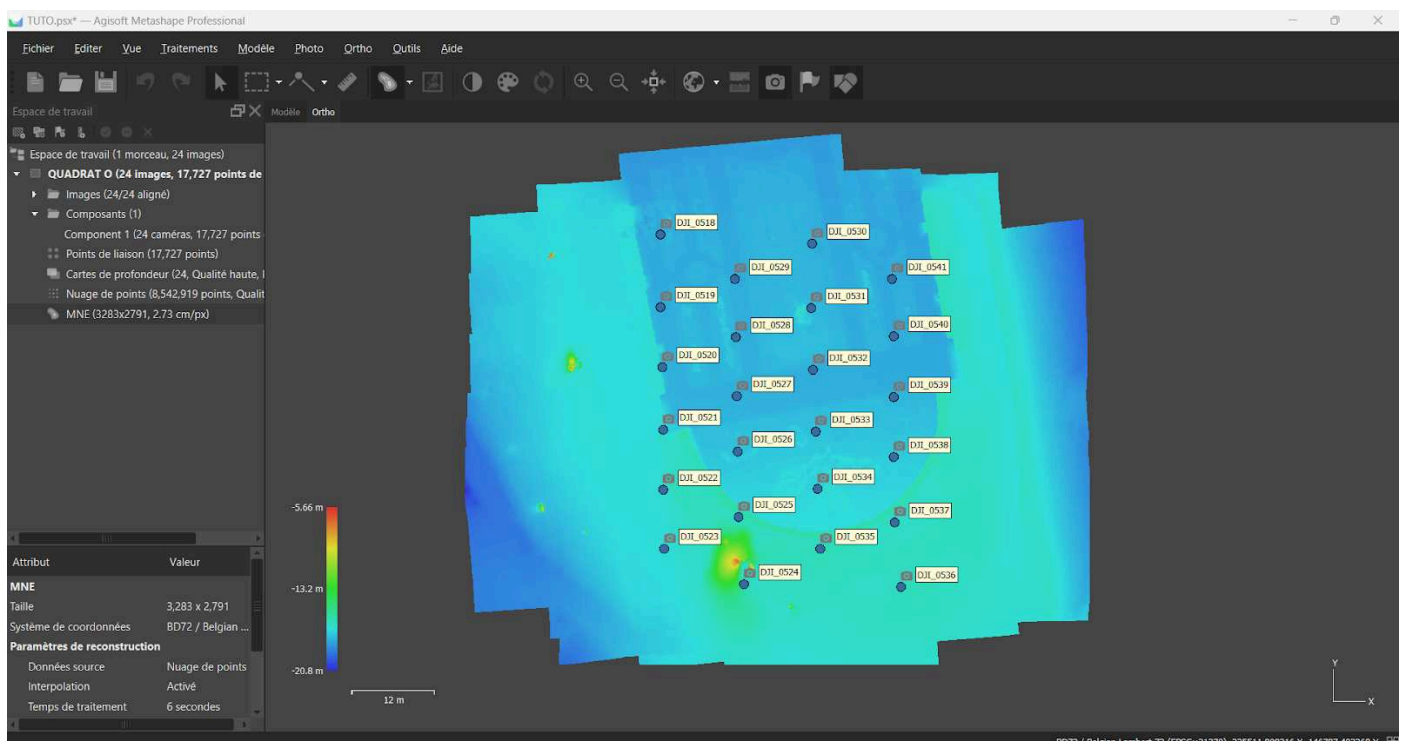


Figure 1.12. : Affichage du Modèle Numérique de Terrain.

étape 7 : génération d'un maillage 3D

- Pour construire un modèle 3D texturé, il est d'abord nécessaire de construire un maillage 3D, à travers la commande "Traitements" → "Construire un Maillage ..."
- Choisir la valeur "Haute" pour le paramètre "Qualité" pour une approche minimaliste, et la valeur "Ultra haute" pour une approche maximaliste.
- Dans l'onglet "Avancé", conserver les paramètres par défaut.

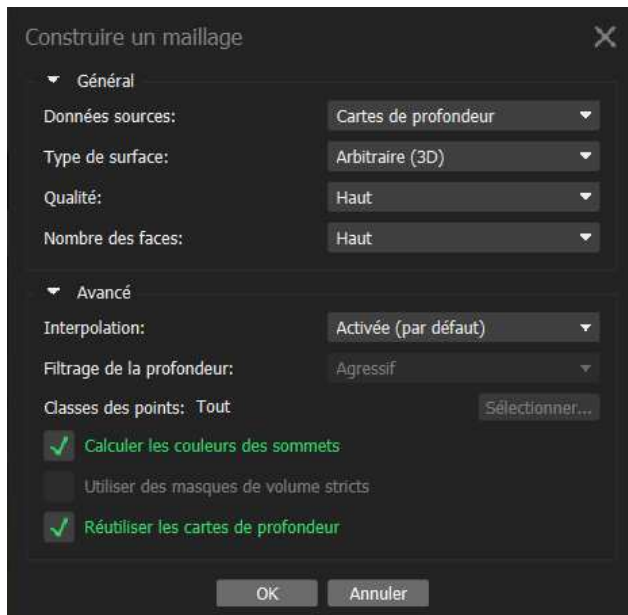


Figure 1.13. : Sélection des paramètres pour la construction d'un maillage 3D selon une approche minimaliste.

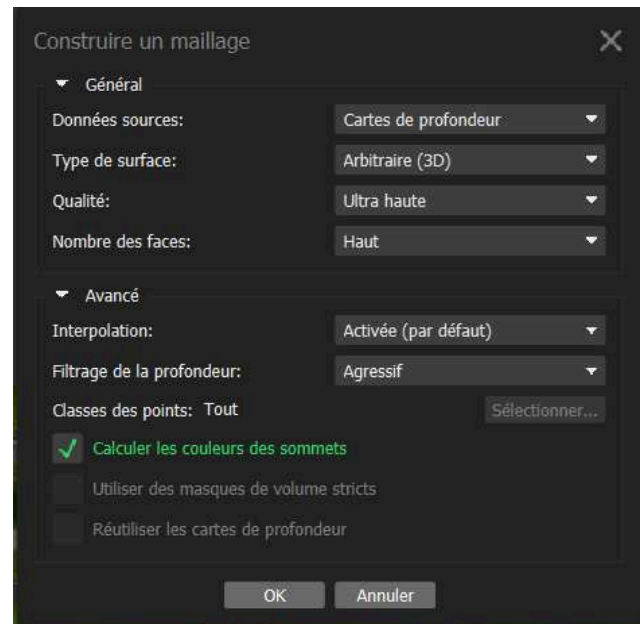


Figure 1.14. : Sélection des paramètres pour la construction d'un maillage 3D selon une approche maximaliste.

- Le résultat est visualisable en sélectionnant "Modèle 3D" dans l'onglet "Espace de Travail".
- Déplacer la souris tout en maintenant le clic gauche enfoncé permet de faire pivoter le modèle selon les trois axes. En maintenant le clic droit enfoncé et en déplaçant la souris, on réalise une translation du modèle sans rotation. La molette de la souris est utilisée pour zoomer et dézoomer.

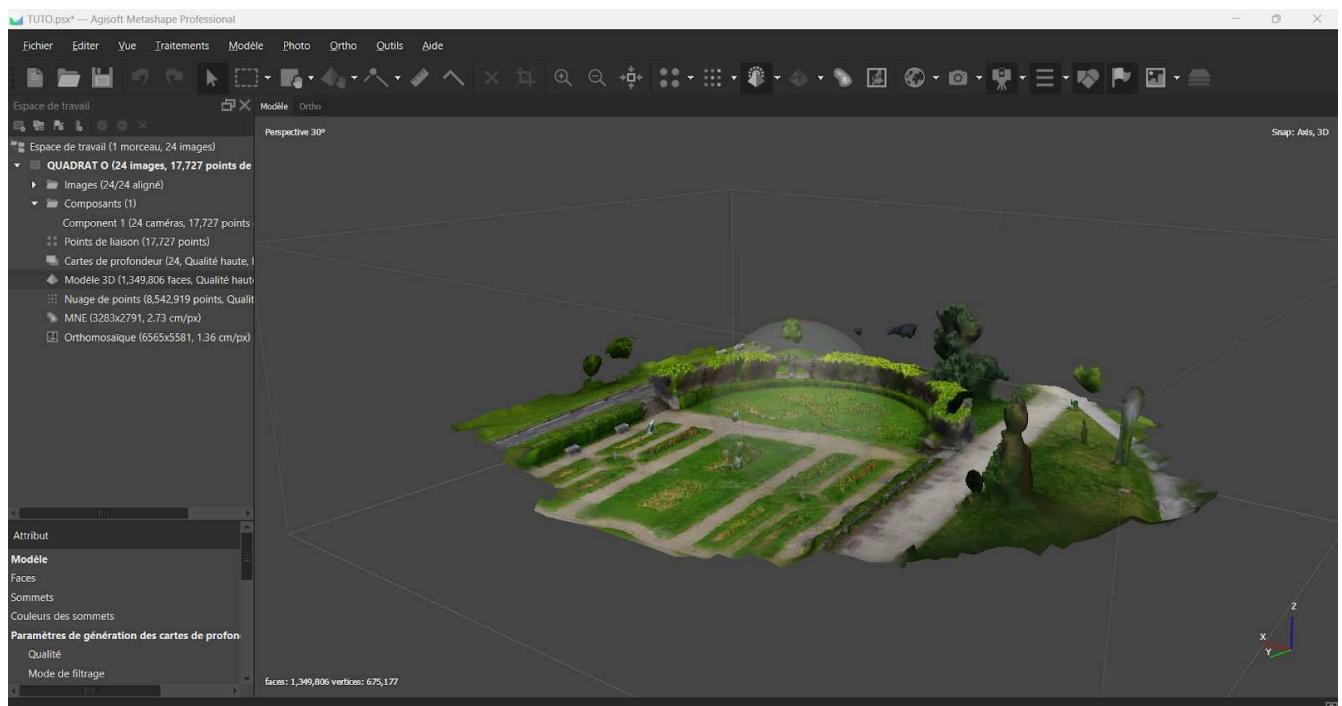


Figure 1.15. : Affichage du maillage 3D.

étape 8 : construire un maillage 3D texturé

- Appliquer la commande "Traitements" → "Construire une texture ...".
- Conserver les "Données source" sur les "Images" et maintenir les autres options par défaut.

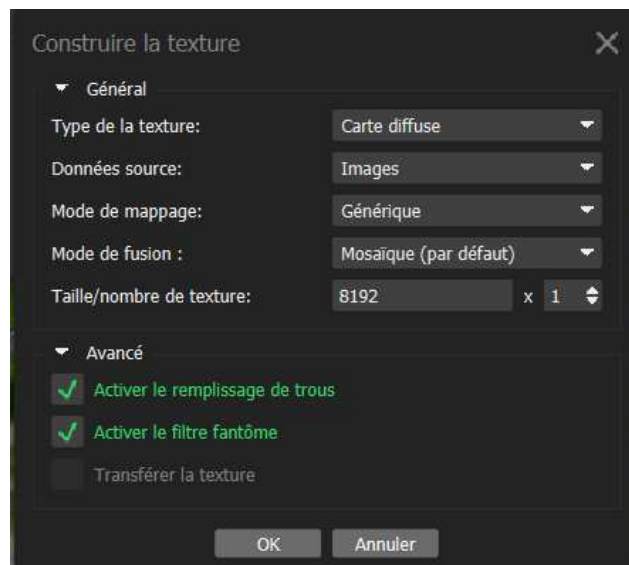


Figure 1.16. : Sélection des paramètres pour la construction d'une texture.

- La texture est ensuite appliquée au modèle 3D préalablement généré, et est visualisable en sélectionnant "Modèle 3D" dans l'onglet "Espace de Travail".

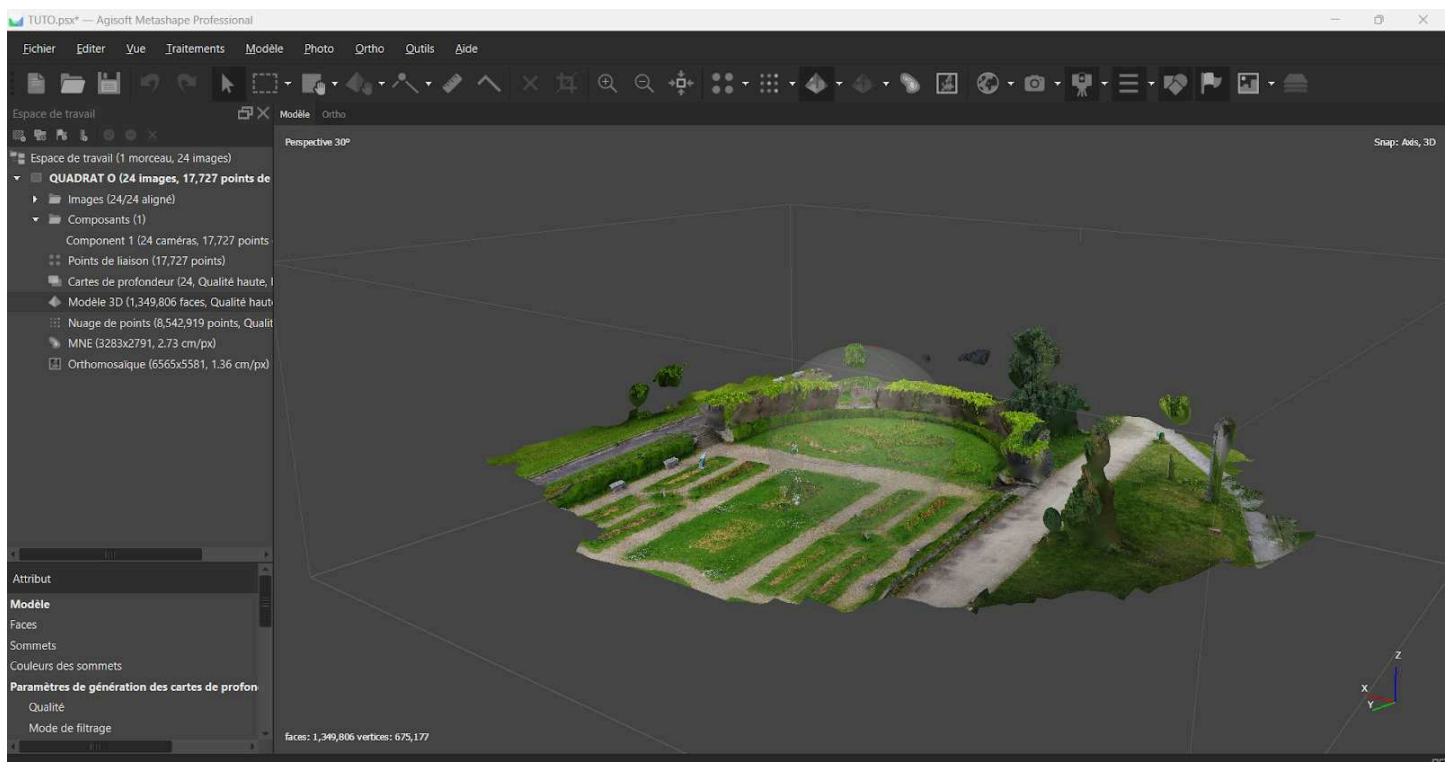


Figure 1.17. : Affichage du maillage 3D texturé.

ANNEXE 2 : Tutoriel détaillé qui présente les étapes à suivre pour la création d'un plan de vol sur l'application Dronelink LLC. ; v.4.9.2, permettant ensuite la réalisation d'un vol automatisé sur le terrain. Production personnelle.

La délimitation de la zone à inventorier peut être directement identifiée sur l'application. Cependant, pour assurer une précision plus accrue, il est préférable de créer manuellement une couche Shapefile de la zone à inventorier sur QGIS, et d'ensuite l'exporter au format KML.

Ce tutoriel détaille la création du plan de vol réalisé pour l'inventorisation des quadrats L (carte 4), N (carte 1), O (carte 2), Q (carte 5) et R (carte 3) de l'étude quantitative, et du quadrat de la zone de jardin pour l'approche minimaliste de l'étude qualitative.

étape 1 : importation des limites de la zone à inventorier

- Se connecter à l'application à l'aide de son identifiant et de son mot de passe.
- Une fois dans l'interface Dronelink, sélectionner le bouton **"Créer"**, situé en bas à gauche de la carte, pour créer un plan de mission.
- Dans la section **"Avancé"**, sélectionner l'option **"Importateur"** qui permet d'importer des fichiers Google Earth (KML/KMZ), Litchi (CSV) Dronelink (dronelink) et Metashape, puis sélectionner le fichier KML qui délimite la zone à inventorier.
- Une page de dialogue s'ouvre, cliquer sur **"Importateur"** en conservant les valeurs par défaut.

Importateur Quadrats Liège Zone 1.kml

1	Polygone	Importer sous Carte
2	Polygone	Importer sous Carte
3	Polygone	Importer sous Carte
4	Polygone	Importer sous Carte
5	Polygone	Importer sous Carte

Fusionner les points plus proches que
1,5 m

IMPORTATEUR **ANNULER**

Figure 2.1. : Page de dialogue pour l'importation de fichiers KML.

- Un plan de vol est généré automatiquement par l'application. Les différentes zones à inventorier sont représentées sous forme de **"Cartes"** et numérotées. Le plan de vol ainsi créé traverse toutes les cartes dans l'ordre de leur numérotation, selon des paramètres définis par défaut.

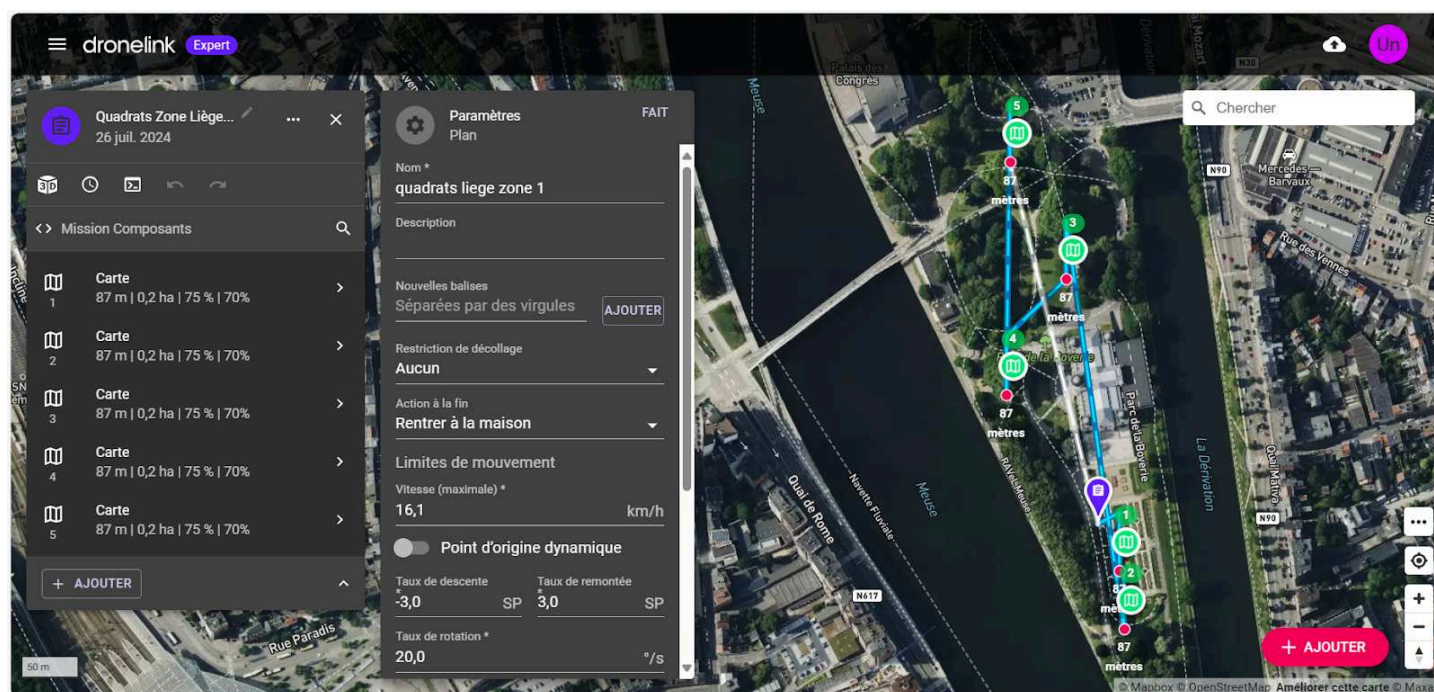


Figure 2.2. : Affichage du plan de vol généré par défaut après l'importation de fichiers KML.

étape 2 : définir des paramètres de vol

Les paramètres de vol définis par défaut pour chacune des surfaces à inventorier peuvent être changés manuellement comme suit :

- Dans l'onglet **"Mission Composants"**, sélectionner la carte correspondant à la zone de vol à modifier.
- Pour chacune des zones à inventorier, entrer les valeurs suivantes :
 - pour l'approche quantitative et qualitative avec des paramètres minimalistes, régler le paramètre **"Altitude"** sur **"40 m"**, le paramètre **"Chevauchement avant"**, qui correspond au recouvrement longitudinal sur **"80 %"** et le paramètre **"Chevauchement latéral"**, qui correspond au recouvrement latéral sur **"80 %"**. Maintenir le paramètre **"Cardan de terrain"** sur **"-90 degrés"** pour une orientation nadir de la caméra. Conserver la valeur **"Normal"** pour le paramètre **"Modèle"** qui correspond à une trajectoire de vol en tondeuse simple.
 - pour l'approche qualitative avec des paramètres maximalistes, régler le paramètre **"Altitude"** sur **"45 m"**, le paramètre **"Chevauchement avant"**, qui correspond au recouvrement longitudinal sur **"80 %"** et le paramètre **"Chevauchement latéral"**, qui correspond au recouvrement latéral sur **"80 %"**. Régler le paramètre **"Cardan de terrain"** sur **"-75 degrés"** pour une orientation oblique de la caméra de 75 degrés. Entrer la valeur **"Grille"** pour le paramètre **"Modèle"** qui correspond à une trajectoire de vol en tondeuse double.

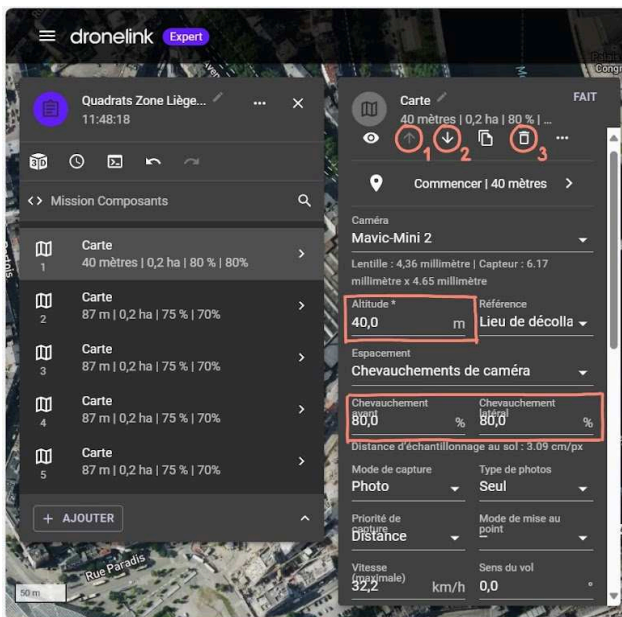


Figure 2.3a. : Sélection des paramètres de vol selon une approche minimaliste.

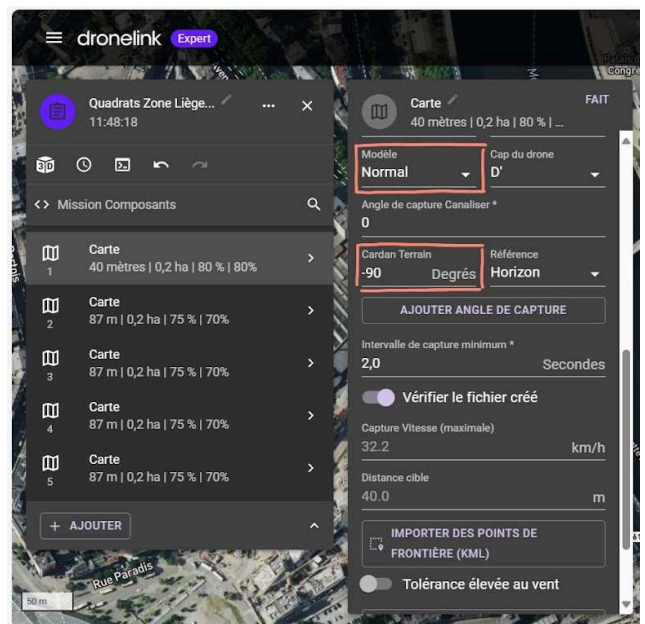


Figure 2.3b. : Sélection des paramètres de vol selon une approche minimaliste.

- Le plan de vol avec les nouveaux paramètres enregistrés est maintenant visible sur la carte.
 - o pour l'approche quantitative et qualitative avec des paramètres minimalistes :

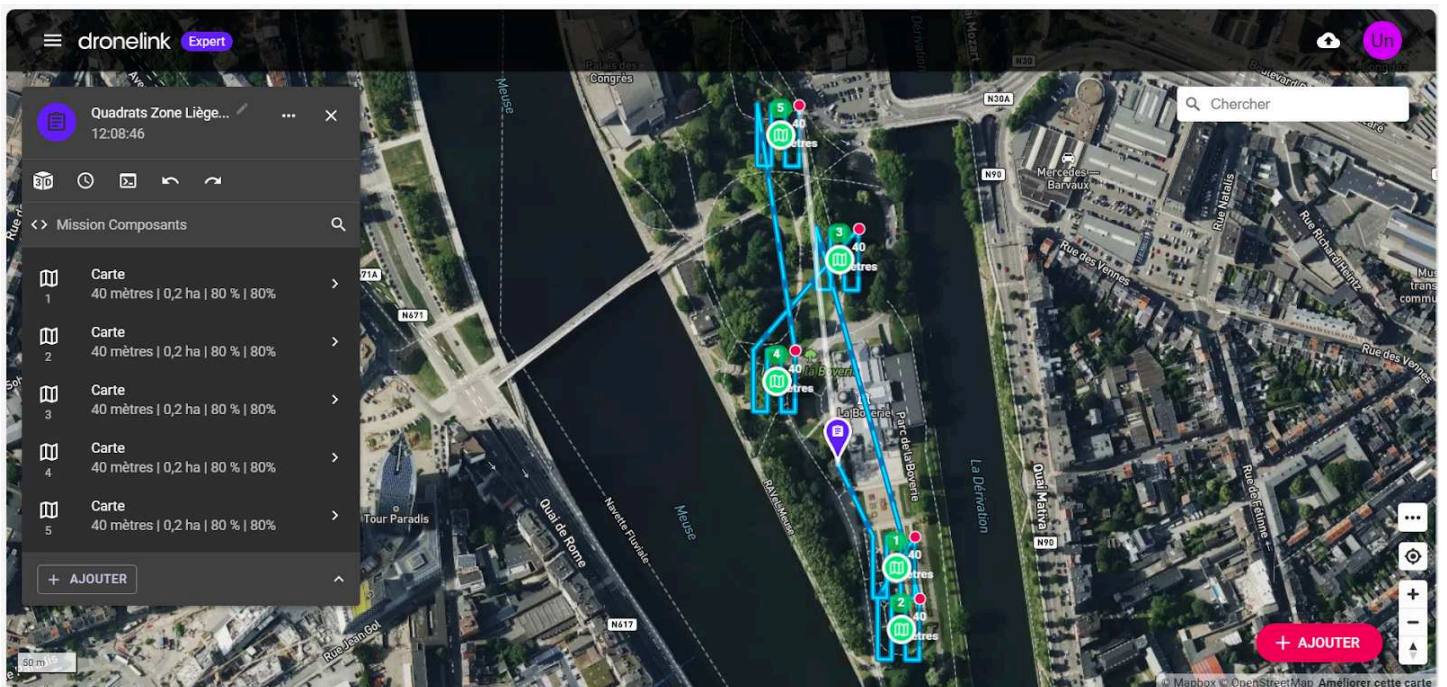


Figure 2.4. : Affichage du plan de vol généré selon l'approche minimaliste.

- pour l'approche qualitative avec des paramètres maximalistes :

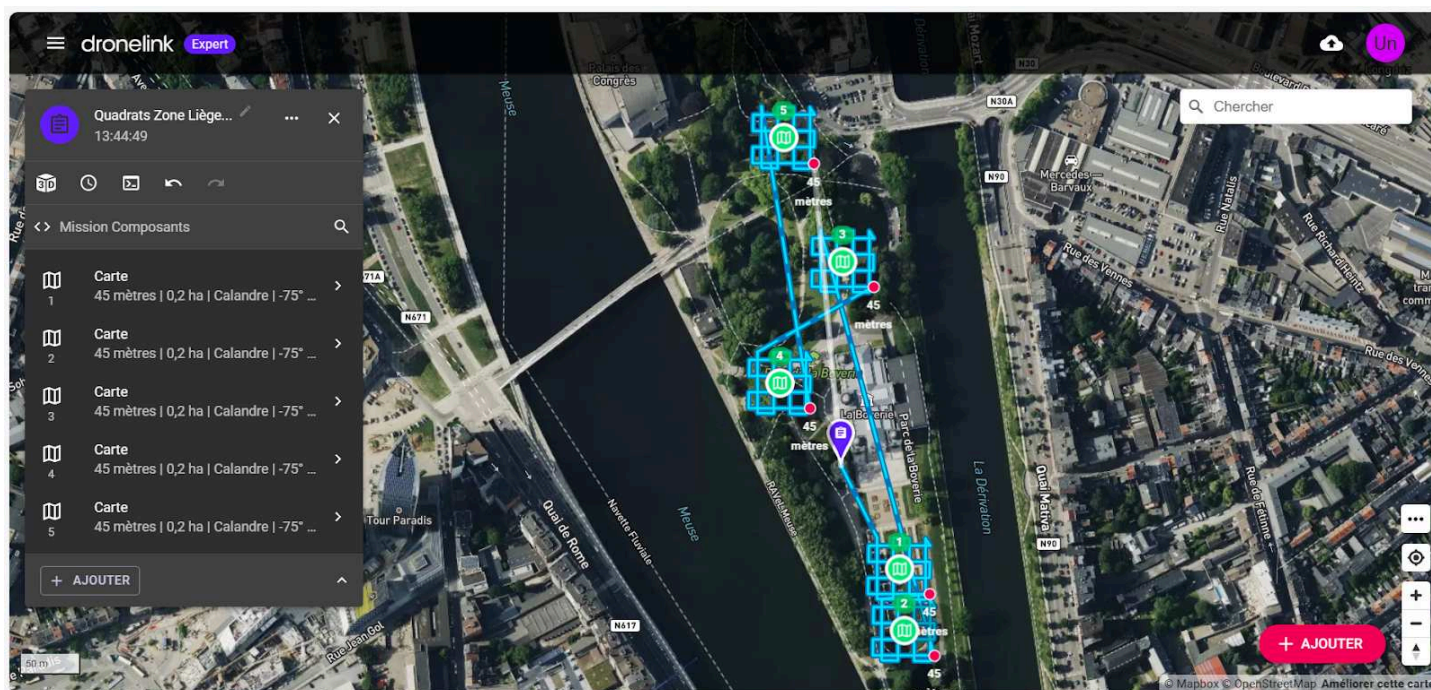


Figure 2.5. : Affichage du plan de vol généré selon l'approche maximaliste.

étape 3 : modifier le plan de vol

- Le symbole de localisation de couleur mauve correspond au point de départ de la mission du drone. Celui-ci peut être déplacé directement sur la carte à l'aide de la souris. Sur le terrain, le drone rejoindra automatiquement le point de départ de la mission définis dans l'application, depuis son point de décollage.
- Les délimitations de la surface à inventorier peuvent également être modifiées dans l'application à l'aide de la souris et des points d'accrochage situés à chaque sommet de la surface. Des points limites peuvent également être ajoutés, grâce aux symboles "+" situés au niveau du milieu de chaque côté de la surface.
- L'ordre des cartes peut être modifié, en sélectionnant la carte à changer, et en utilisant les flèches qui s'affichent, pour la faire remonter ou redescendre dans l'ordre définis par défaut. Le symbole corbeille permet quant à lui de supprimer une carte.

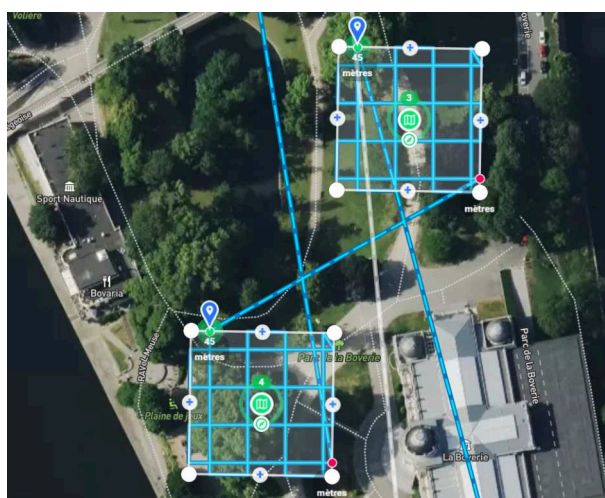


Figure 2.6. : Points d'accrochage pour modifier la surface à inventorier..

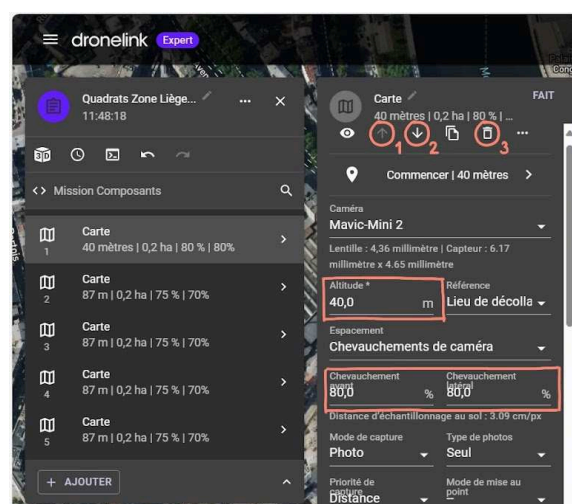


Figure 2.7. : Commandes pour faire remonter (1) ou descendre (2) la carte dans l'ordre définis par défaut, ou pour la supprimer (3).

- Des points de contrôle peuvent également être ajoutés au plan de vol, pour permettre, par exemple, de contourner un obstacle. Pour ce faire, dans l'onglet **"Mission Composants"**, cliquer sur le bouton **"Ajouter"** → **"Avancé"** → **"Point de contrôle"**. La position du point de contrôle dans l'ordre de numérotation peut être modifiée de la même manière que les cartes. Il peut également être supprimé.
- Une fois le plan de vol modifié, les estimations de la mission peuvent être consultées en cliquant sur le symbole de l'horloge, dans l'onglet **"Mission Composants"**. Cet onglet indique l'**"Intérim total"** qui correspond au temps total estimé de la mission, la distance totale à parcourir, le nombre total de photographies ou de vidéos à capturer, la vitesse de vol maximale et l'altitude de vol.

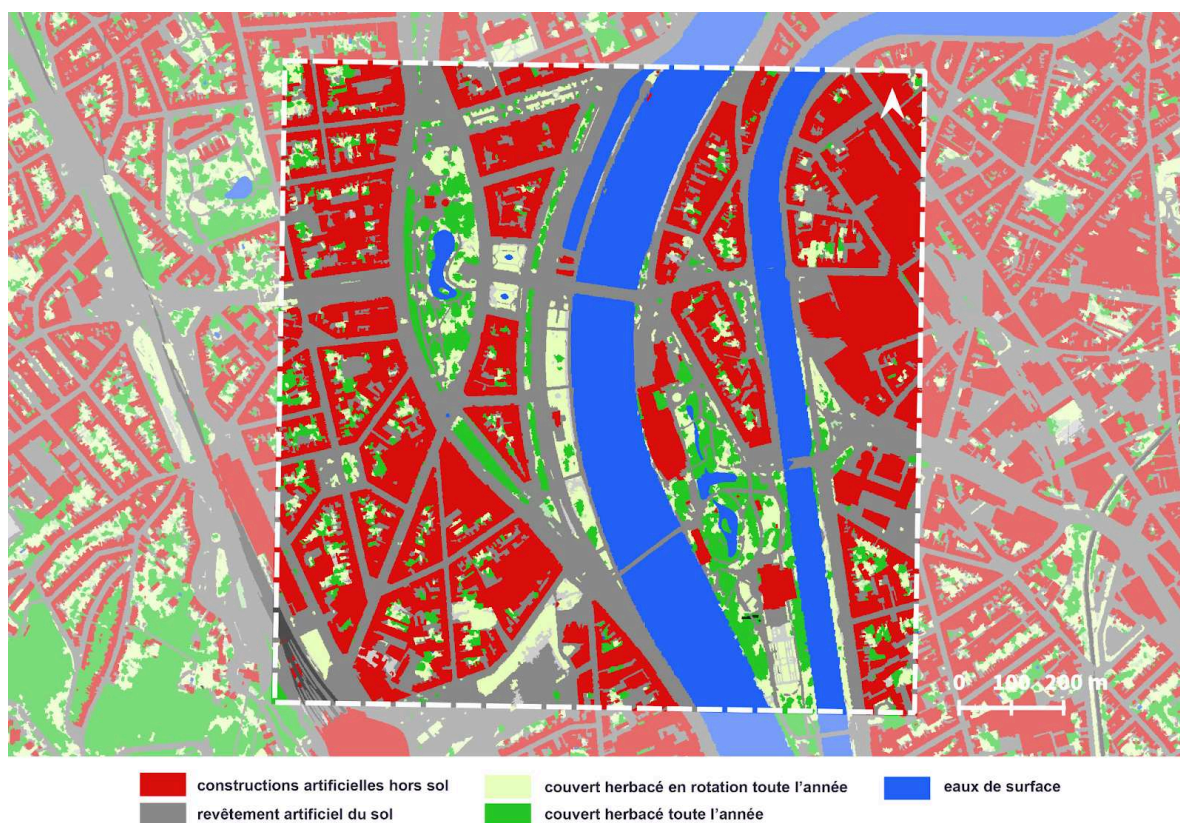
étape 4 : réalisation d'un vol automatisé, pris en charge par Dronelink

- Le jour de l'opération, connecter le drone et la télécommande à un téléphone portable.
- Se connecter à son compte DroneLink à l'aide de son téléphone portable.
- Sélectionner le plan de vol à réaliser et lancer la mission en appuyant sur le bouton **"Départ"**.
- L'opération peut être interrompue à tout moment en appuyant sur le symbole **"Pause"**. La mission reprendra ensuite automatiquement depuis l'endroit où elle a été interrompue, une fois le bouton de **"Départ"** sélectionné.
- Une fois l'opération terminée, le drone peut être ramené manuellement vers sa zone d'atterrissage.

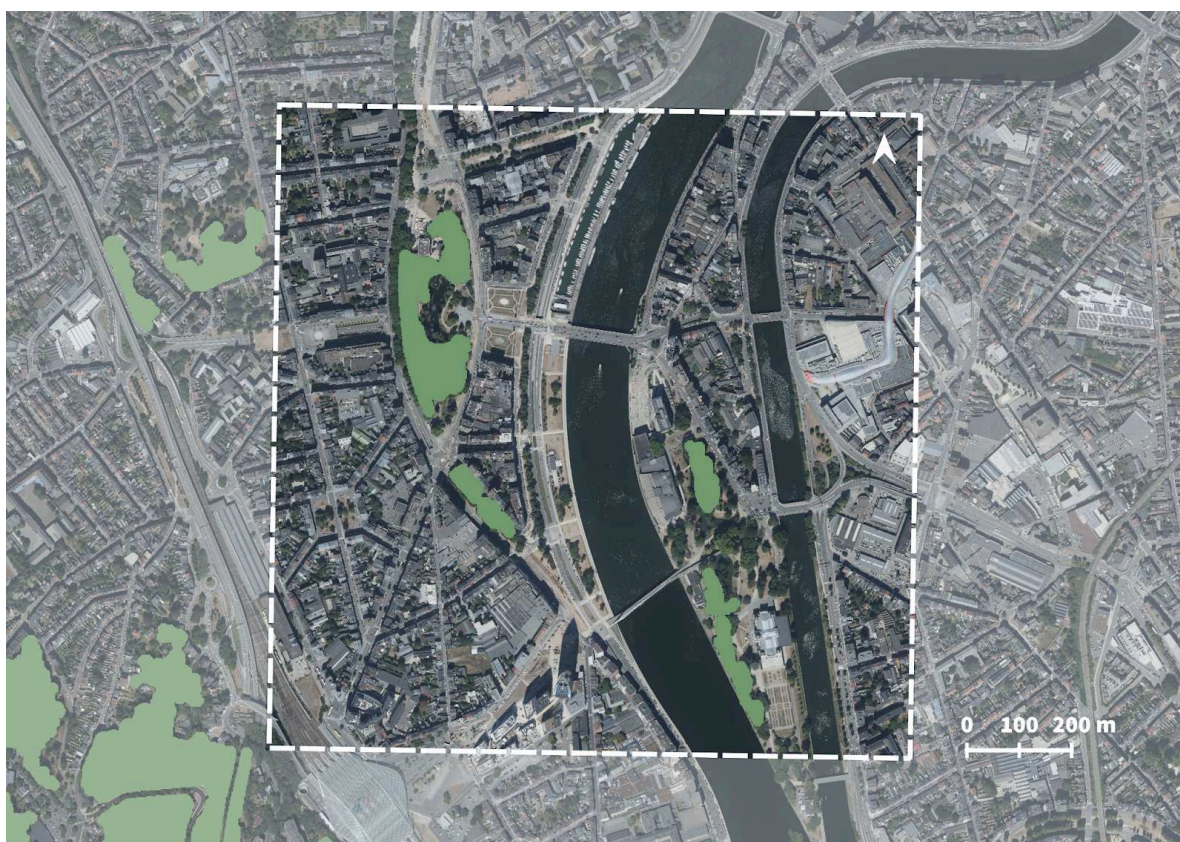
ANNEXE 3 : Tableau récapitulatif des noms de quadrats analysés dans le cadre de l'approche quantitative de cette étude, et de la typologie de végétation urbaine à laquelle ils appartiennent. Production personnelle.

NOM DU QUADRAT	TYPLOGIE
QUADRAT A	corridor alignements d'arbres de rue quadrat 1
QUADRAT B	corridor alignements d'arbres de rue quadrat 2
QUADRAT C	corridor alignements d'arbres de rue quadrat 3
QUADRAT D	corridor berges végétalisées quadrat 1
QUADRAT E	corridor berges végétalisées quadrat 2
QUADRAT F	corridor berges végétalisées quadrat 3
QUADRAT G	corridor parcs linéaires quadrat 1
QUADRAT H	corridor parcs linéaires quadrat 2
QUADRAT I	corridor parcs linéaires quadrat 3
QUADRAT J	patch zones boisées quadrat 1
QUADRAT K	patch zones boisées quadrat 2
QUADRAT L	patch zones boisées quadrat 3
QUADRAT M	patch zones de jardin quadrat 1
QUADRAT N	patch zones de jardin quadrat 2
QUADRAT O	patch zones de jardin quadrat 3
QUADRAT P	patch zones ouvertes quadrat 1
QUADRAT Q	patch zones ouvertes quadrat 2
QUADRAT R	patch zones ouvertes quadrat 3

ANNEXE 4 : Carte d'occupation du sol en Wallonie - WALOUS 2018, au sein du périmètre sélectionné. (Géoportail de la Wallonie, s.d.-c).



ANNEXE 5 : Carte du masque forestier, au sein de périmètre sélectionné. (Géoportail de la Wallonie, s.d.-a).



ANNEXE 6 : Carte des plans de vol réalisés sur le logiciel Dronelink pour l'inventaire de l'étude quantitative et pour l'inventaire de l'étude qualitative, selon une approche minimaliste. Production personnelle.

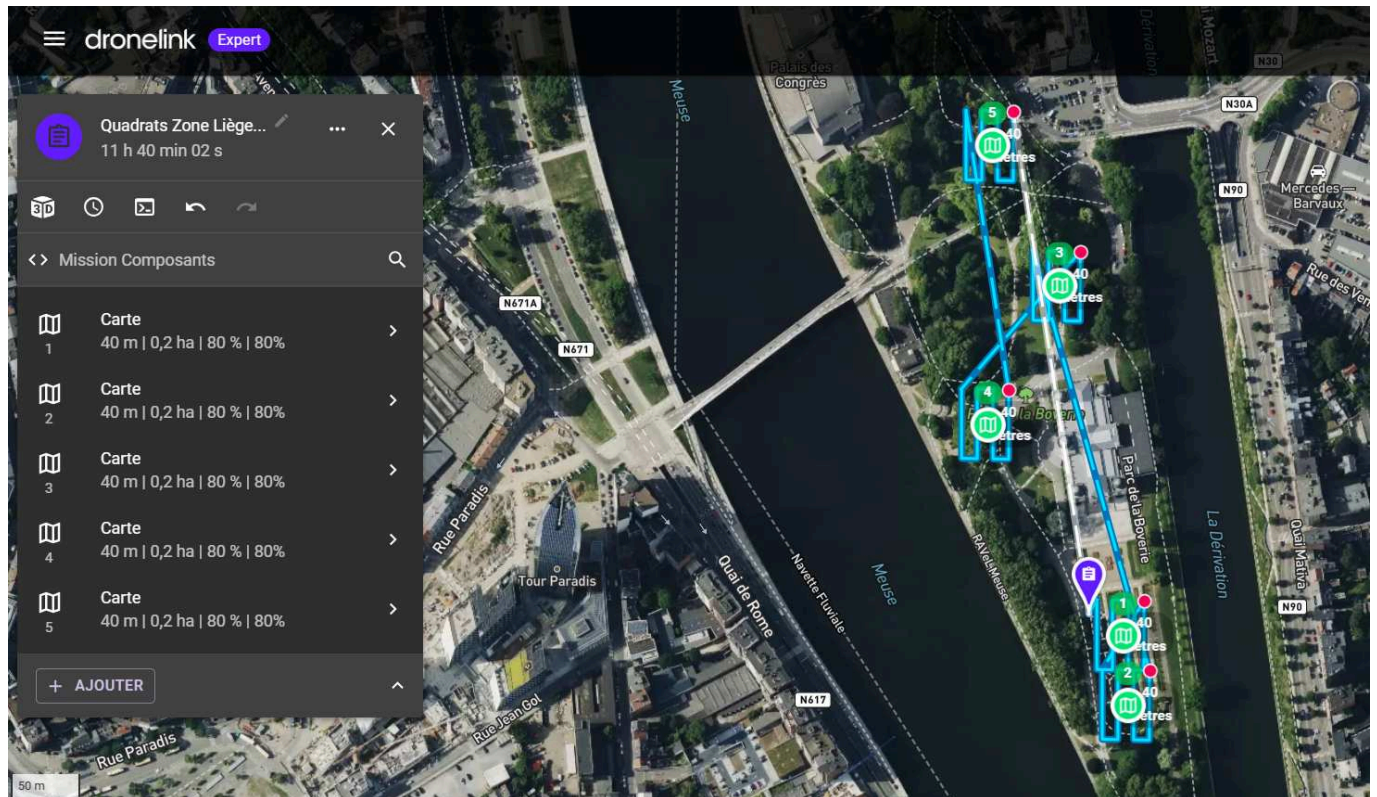


Figure 6.1. : Plan de vol pour l'inventorisation des quadrats L (carte 4), N (carte 1), O (carte 2), Q (carte 5) et R (carte 3) de l'étude quantitative, et du quadrat de la zone de jardin pour l'approche minimaliste de l'étude qualitative (carte 1).

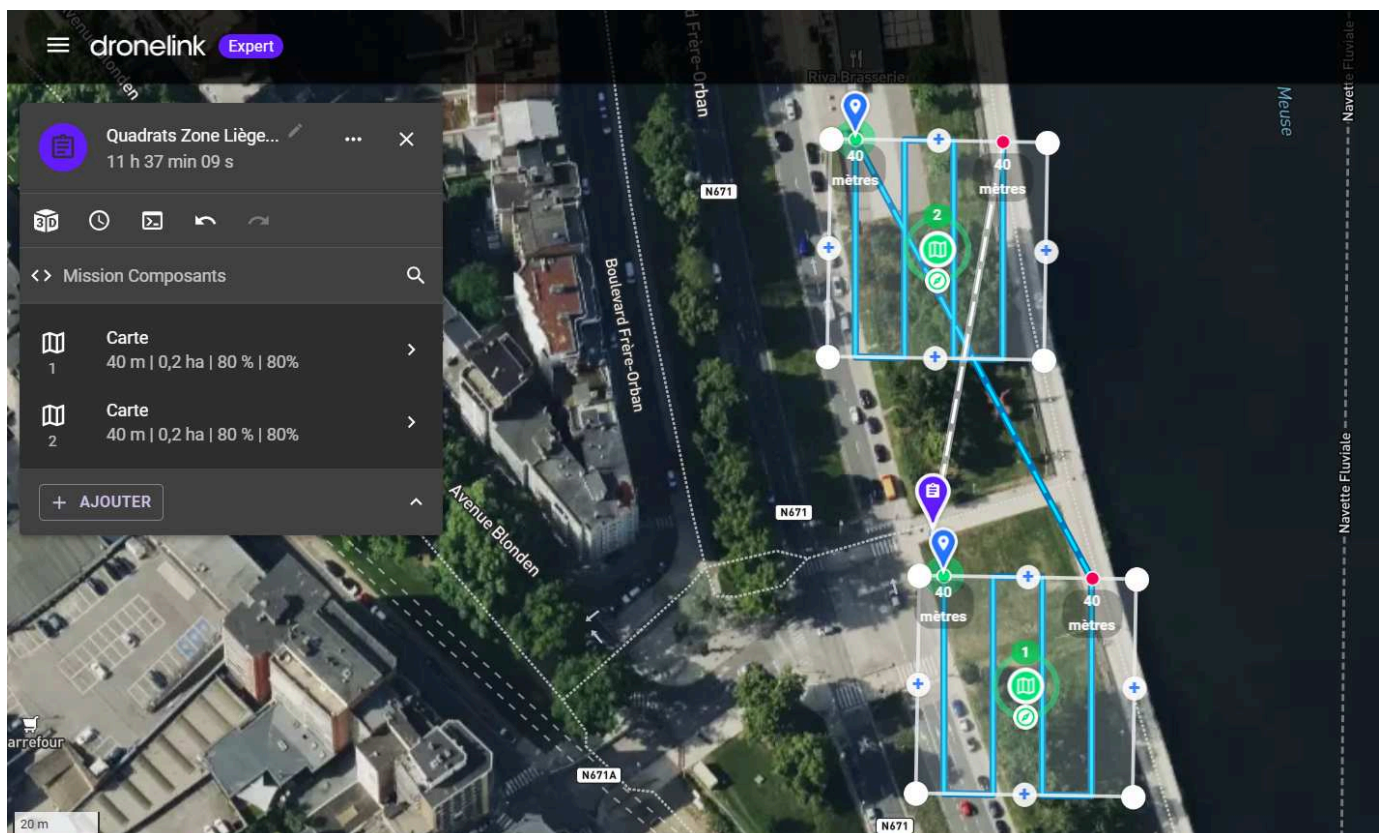


Figure 6.2. : Plan de vol pour l'inventorisation des quadrats E (carte 2) et F (carte 1) de l'étude quantitative.

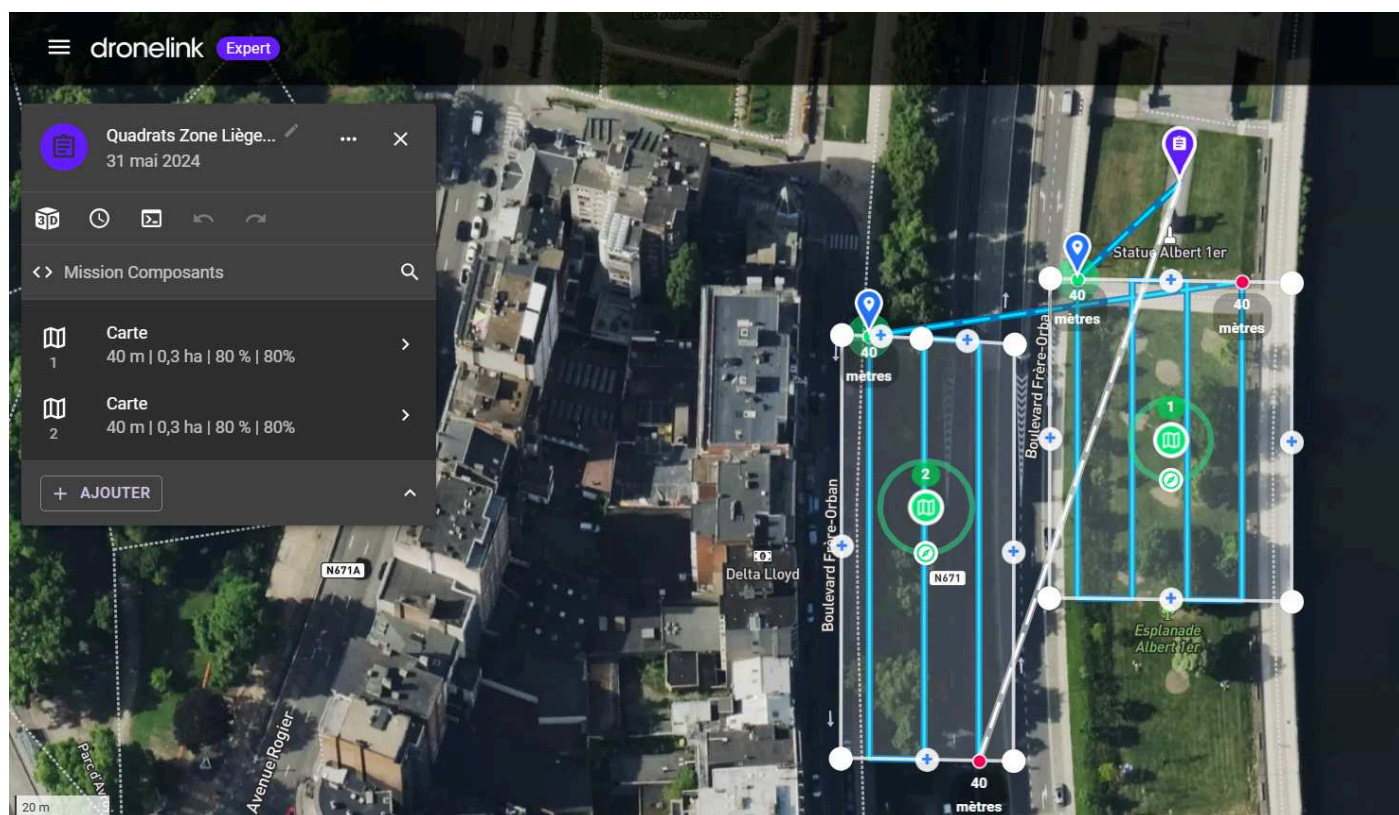


Figure 6.3. : Plan de vol pour l'inventorisation des quadrats A (carte 2) et D (carte 1) de l'étude quantitative, et du quadrat de l'alignement pour l'approche minimaliste de l'étude qualitative (carte 2).

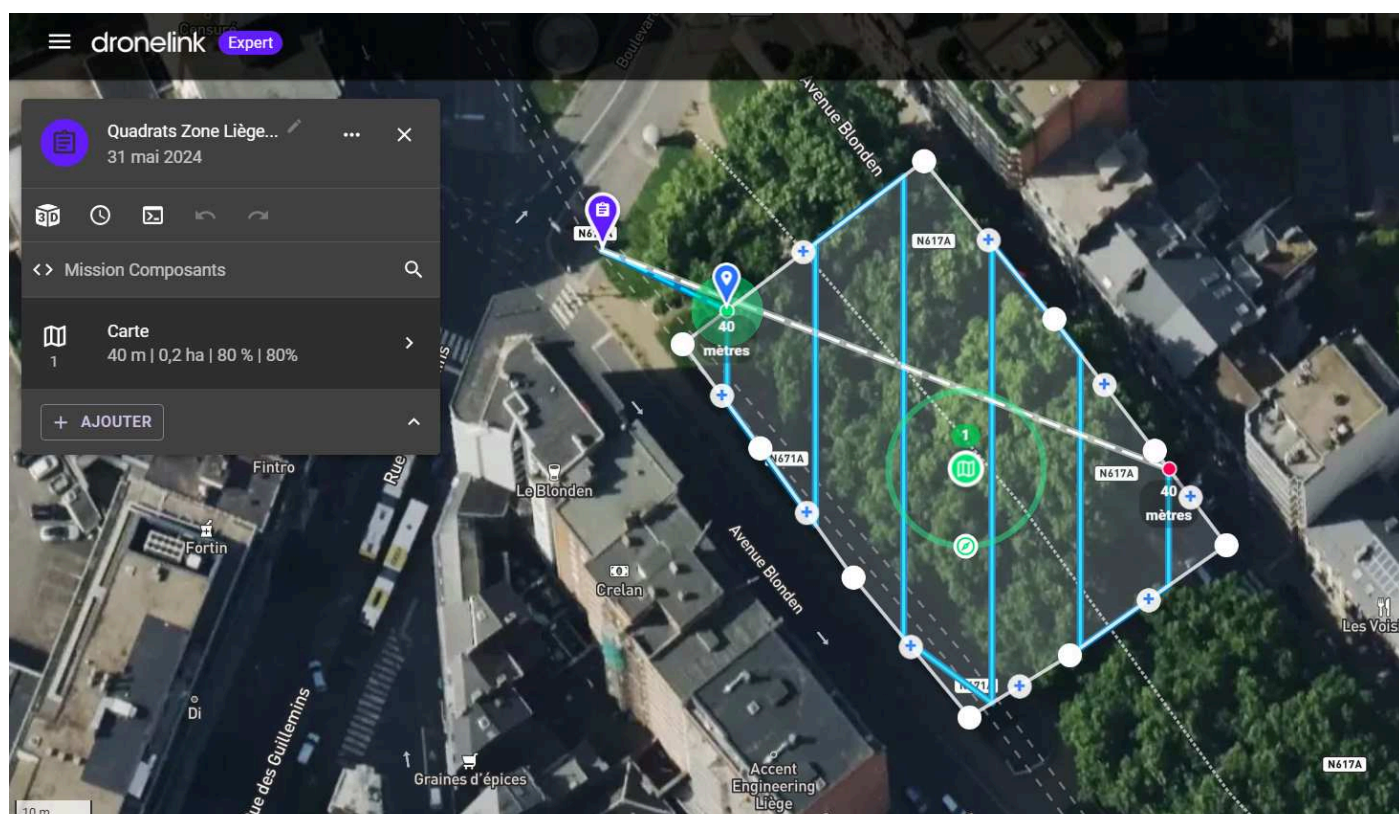


Figure 6.4. : Plan de vol, sur le logiciel Dronelink, pour l'inventorisation des quadrats I (carte 1) de l'étude quantitative, et du quadrat du parc linéaire pour l'approche minimaliste de l'étude qualitative (carte 1).

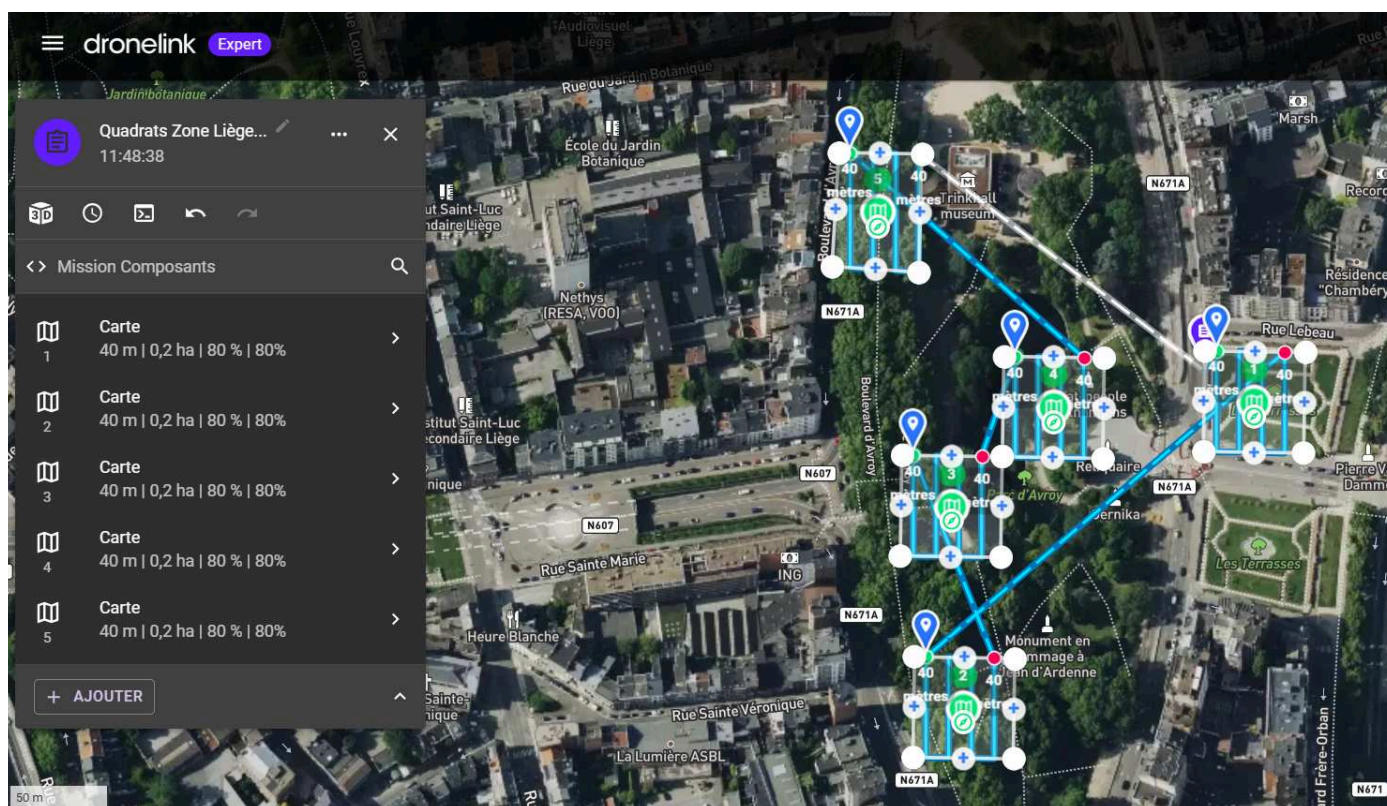


Figure 6.5. : Plan de vol, sur le logiciel Dronelink, pour l'inventorisation des quadrats B (carte 5), J (carte 3), K (carte 2), M (carte 1), P (carte 4) de l'étude quantitative.

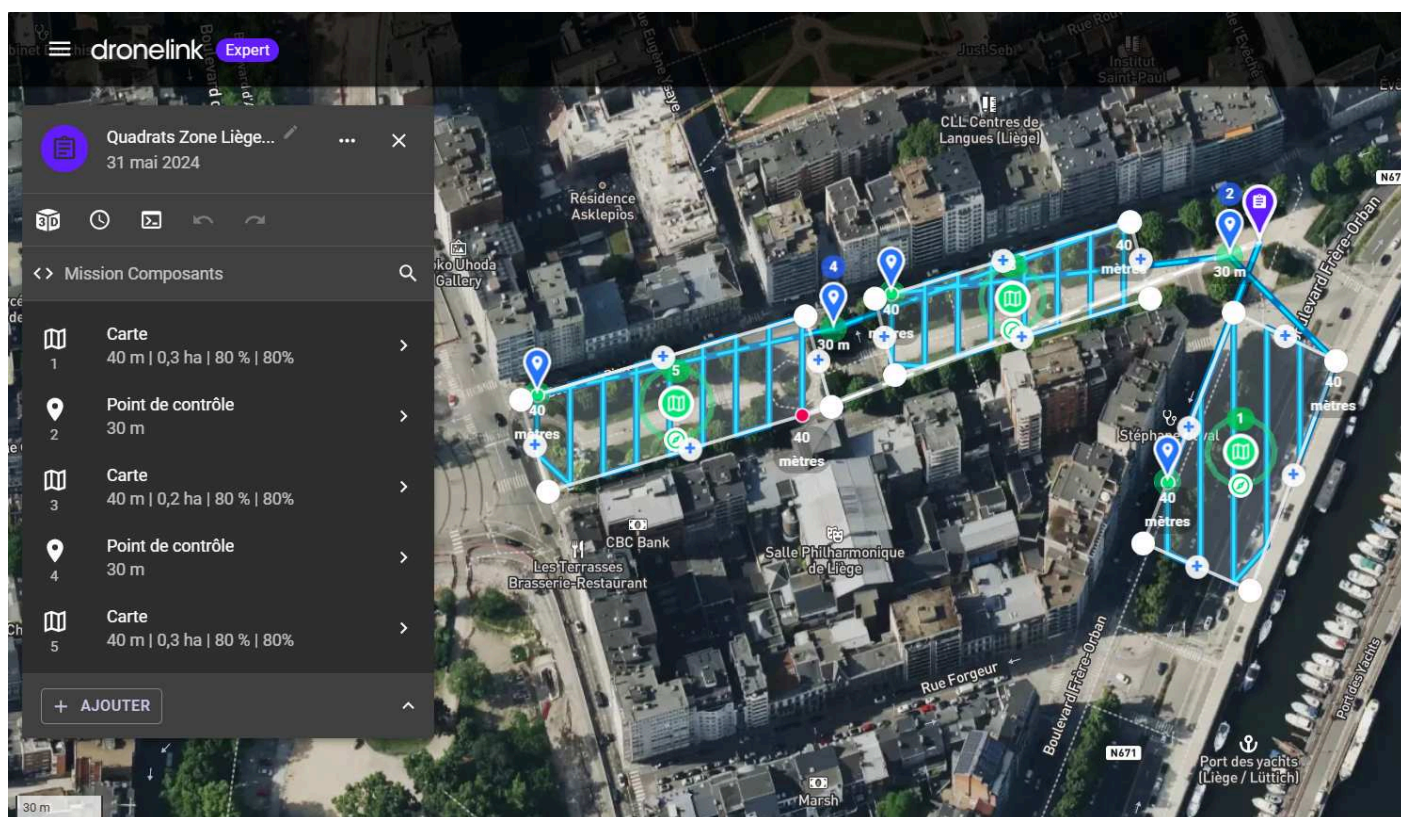


Figure 6.6. : Plan de vol pour l'inventorisation des quadrats C (carte 1), G (carte 5) et H (carte 3) de l'étude quantitative.

ANNEXE 7 : Carte des plans de vol réalisés sur le logiciel Dronelink pour l'inventaire de l'étude qualitative, selon une approche maximaliste. Production personnelle.

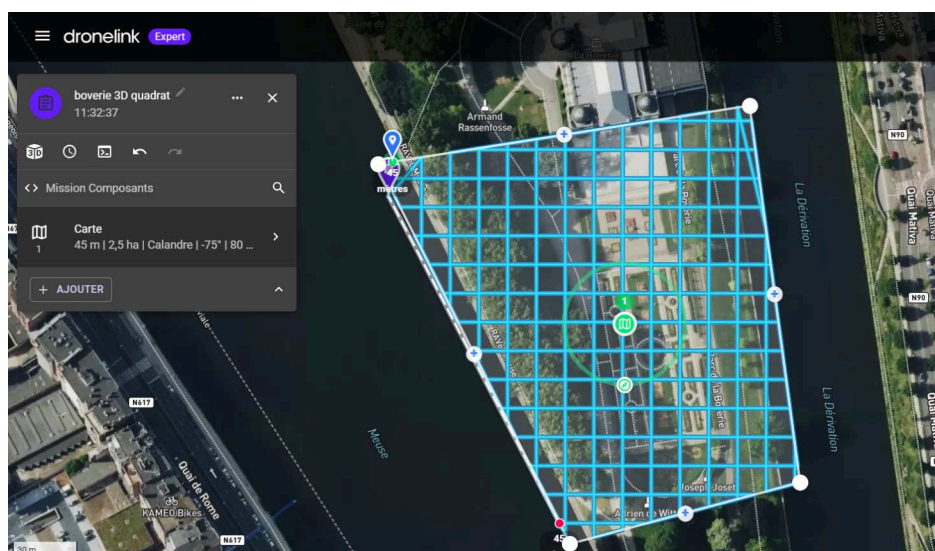


Figure 7.1. : Plan de vol pour l'inventorisation du quadrat de la zone de jardin pour l'approche maximaliste de l'étude qualitative.

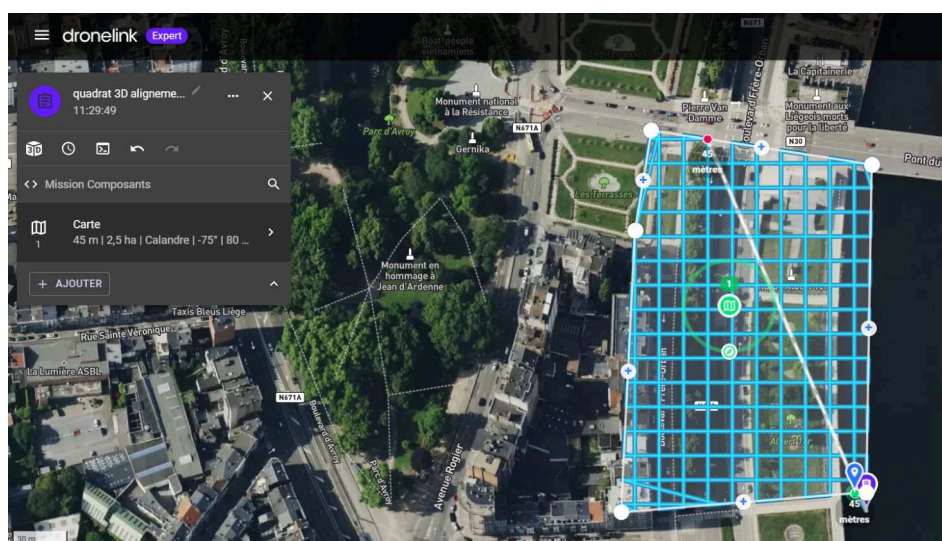


Figure 7.2. : Plan de vol pour l'inventorisation du quadrat de l'alignement d'arbres pour l'approche maximaliste de l'étude qualitative.

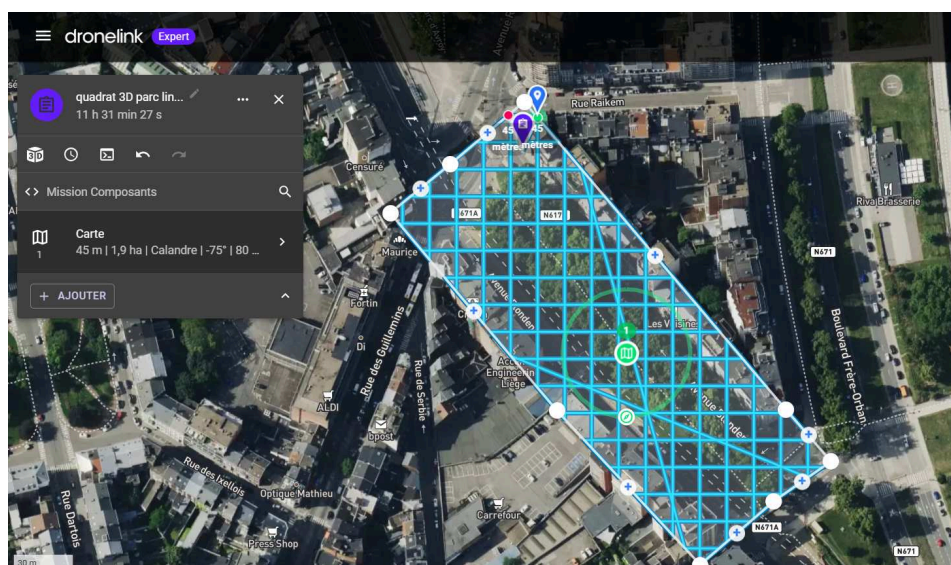


Figure 7.3. : Plan de vol pour l'inventorisation du quadrat du parc linéaire pour l'approche maximaliste de l'étude qualitative.

ANNEXE 8 : Ensemble des cartographies et des données générées pour le quadrat A, lors de l'étude quantitative. Production personnelle.

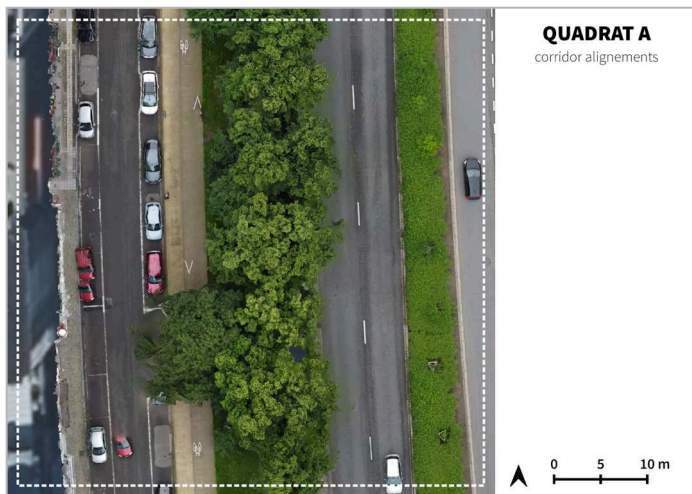


Figure 8.1. : Orthomosaïque.

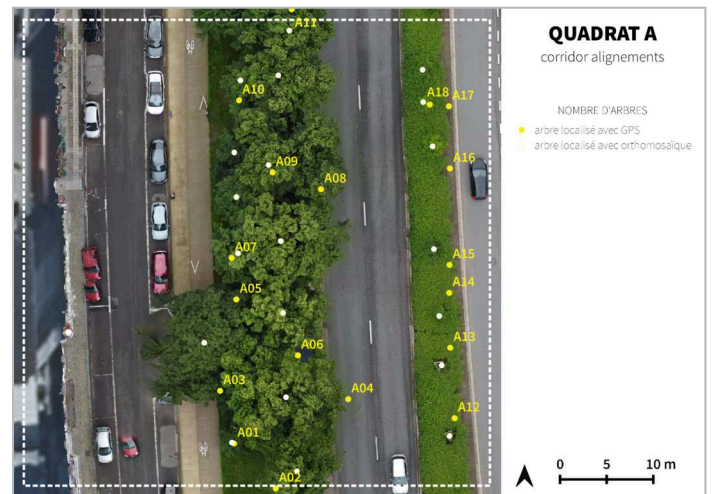


Figure 8.2. : Carte de comparaison du nombre d'arbres identifiés à l'aide de l'orthomosaïque et du MNS générés à partir des données drone et du GPS Garmin.

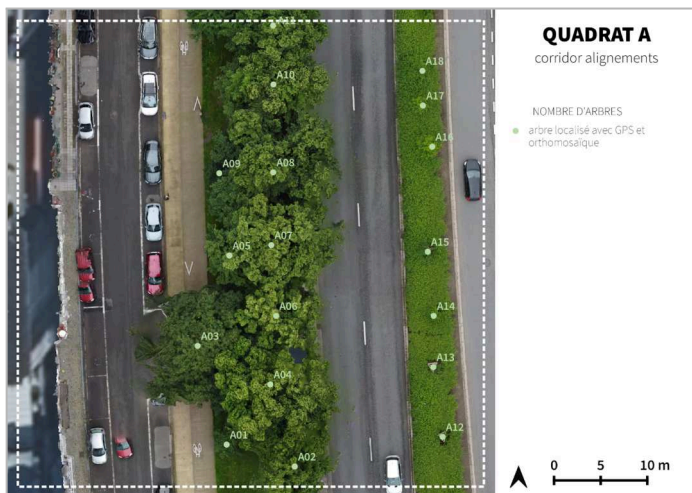


Figure 8.3. : Carte du nombre d'arbres identifiés à l'aide de l'orthomosaïque générée à partir des données drone et du GPS Garmin.

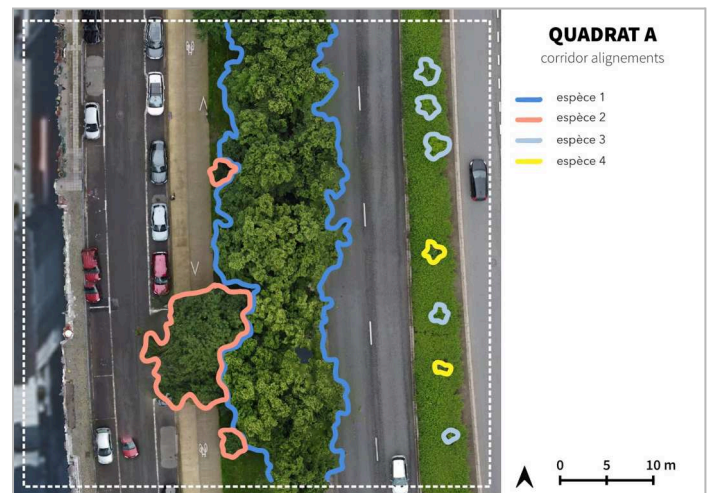


Figure 8.4. : Carte du nombre d'espèces d'arbres identifiées via des observations de l'orthomosaïque générée à partir des données drone.

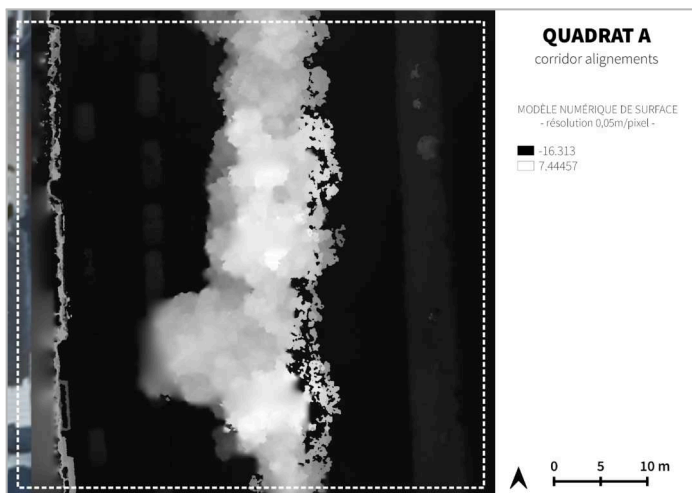


Figure 8.5. : Modèle Numérique de Surface de résolution 0,05 m/pixel.

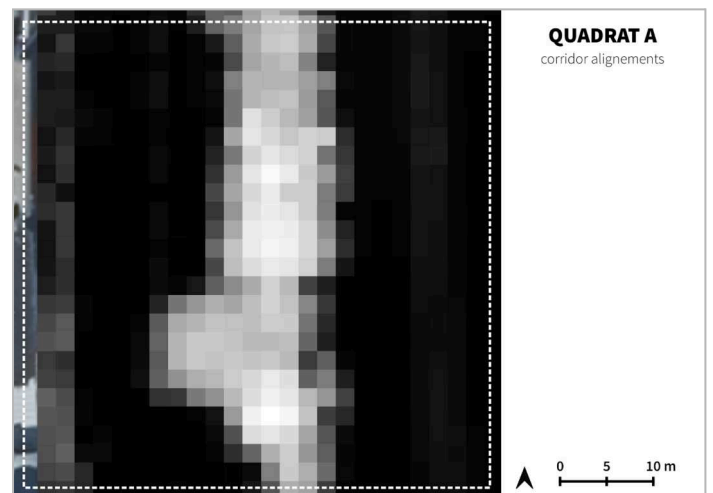


Figure 8.6. : Modèle Numérique de Surface de résolution 2 m/pixel.

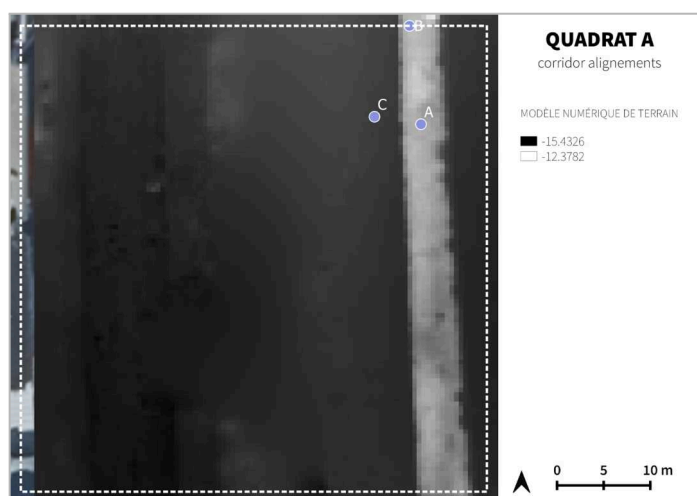


Figure 8.7. : Modèle Numérique de Terrain et localisation des 3 points aléatoirement sélectionnés pour l'indicateur de topographie.

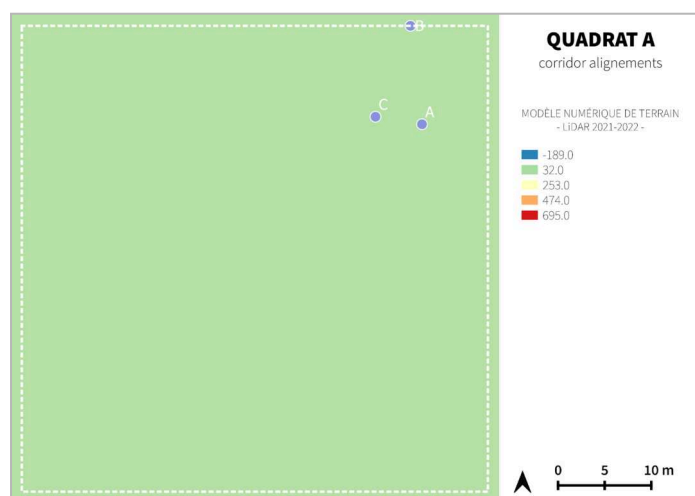


Figure 8.8. : Modèle Numérique de Terrain généré à partir des données LiDAR 2021 et localisation des 3 points aléatoirement sélectionnés pour l'indicateur de topographie.

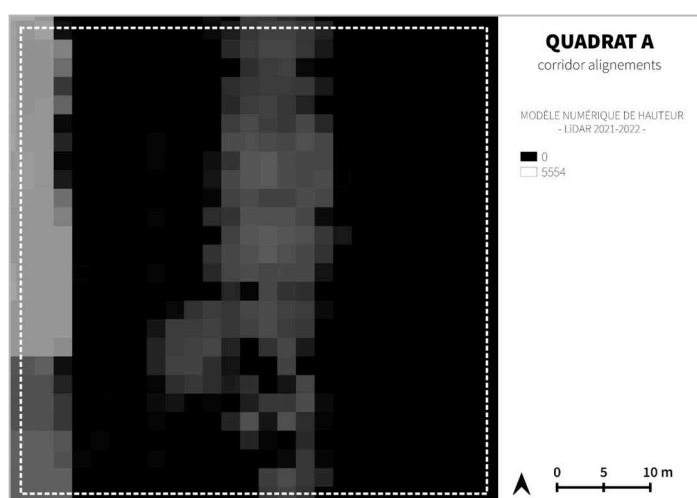


Figure 8.9. : Modèle Numérique de Hauteur, généré à partir des données LiDAR 2021.

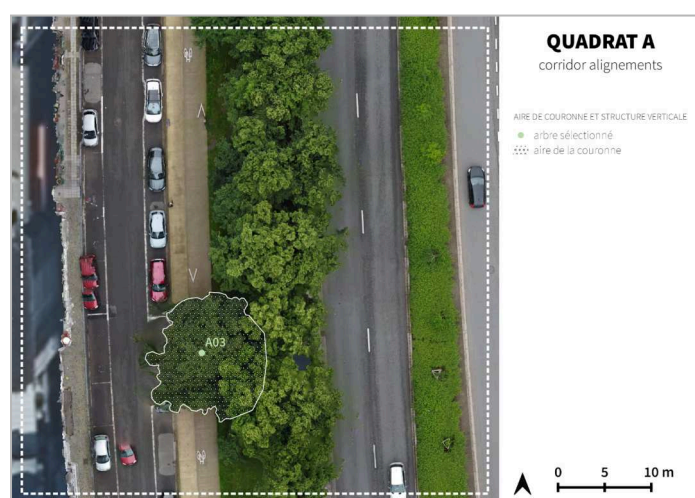


Figure 8.10. : Carte d'identification de l'arbre sélectionné pour les indicateurs d'aire de couronne et de structure verticale.

Tableau 8.1. Tableau de recensement des espèces d'arbres identifiées à partir d'un inventaire de terrain.

QUADRAT A			
ARBRES	ESPÈCES RECENSÉES	ARBRES	ESPÈCES RECENSÉES
A01	<i>Tilia x europaea</i> L.	A10	<i>Tilia x europaea</i> L.
A02	<i>Tilia x europaea</i> L.	A11	<i>Tilia x europaea</i> L.
A03	<i>Aesculus hippocastanum</i> L.	A12	<i>Fraxinus angustifolia</i> Vahl
A04	<i>Tilia x europaea</i> L.	A13	<i>Fraxinus angustifolia</i> Vahl
A05	<i>Tilia x europaea</i> L.	A14	<i>Fraxinus angustifolia</i> Vahl
A06	<i>Tilia x europaea</i> L.	A15	<i>Fraxinus angustifolia</i> Vahl
A07	<i>Tilia x europaea</i> L.	A16	<i>Prunus avium</i> (L.) L.
A08	<i>Tilia x europaea</i> L.	A17	<i>Prunus avium</i> (L.) L.
A09	<i>Tilia x europaea</i> L.	A18	<i>Prunus avium</i> (L.) L.

ANNEXE 9 : Ensemble des cartographies et des données générées pour le quadrat B, lors de l'étude quantitative. Production personnelle.

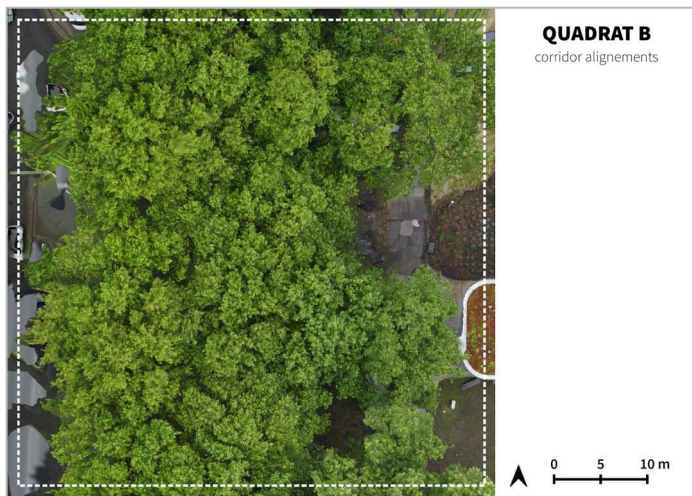


Figure 9.1. : Orthomosaïque.

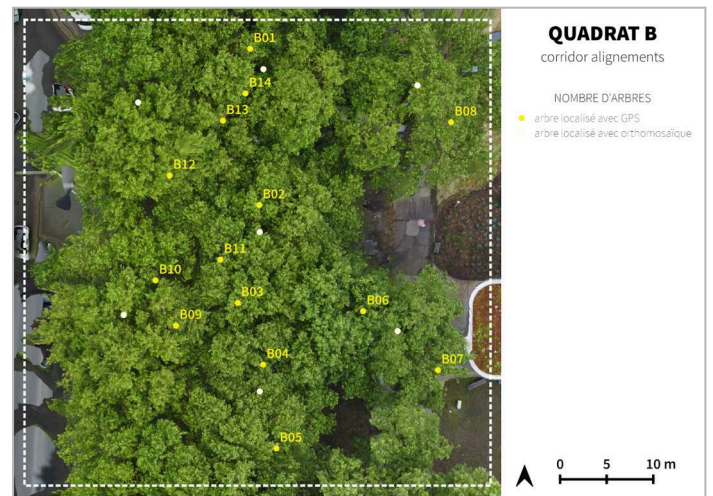


Figure 9.2. : Carte de comparaison du nombre d'arbres identifiés à l'aide de l'orthomosaïque et du MNS générés à partir des données drone et du GPS Garmin.

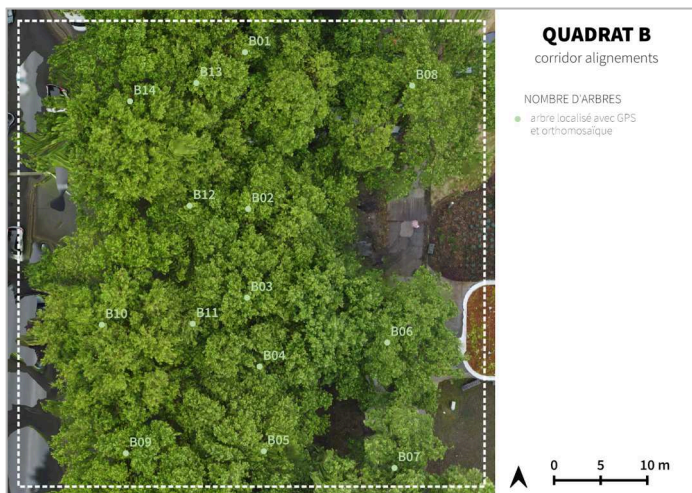


Figure 9.3. : Carte du nombre d'arbres identifiés à l'aide de l'orthomosaïque générée à partir des données drone et du GPS Garmin.

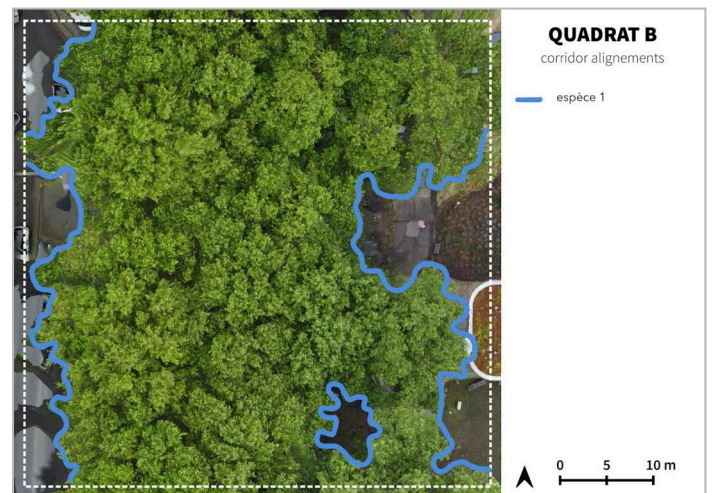


Figure 9.4. : Carte du nombre d'espèces d'arbres identifiées via des observations de l'orthomosaïque générée à partir des données drone.

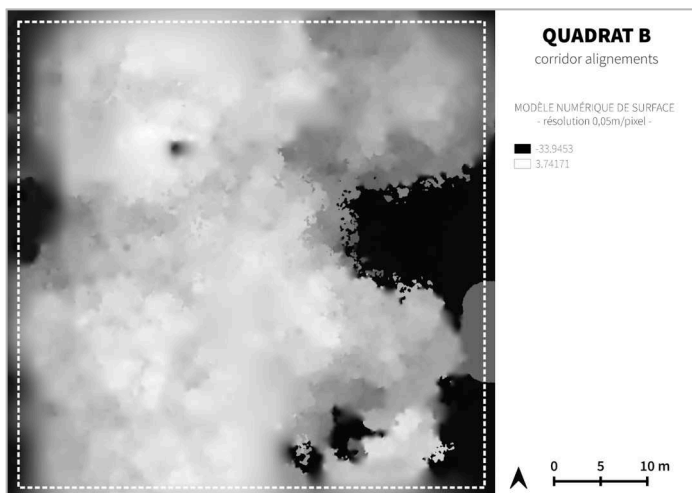


Figure 9.5. : Modèle Numérique de Surface de résolution 0,05 m/pixel

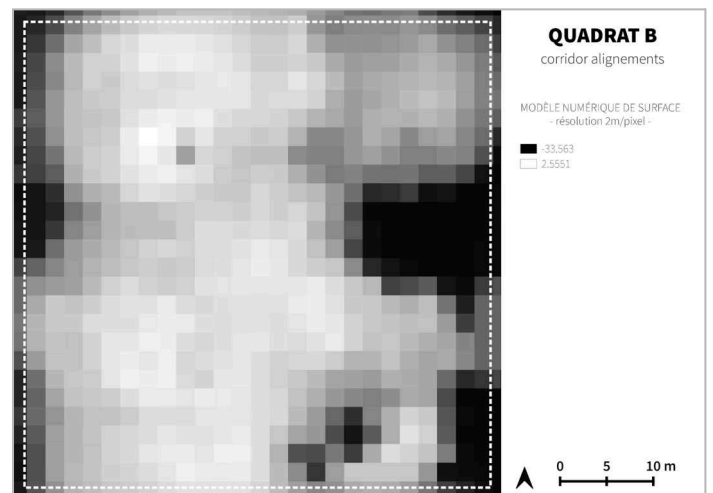


Figure 9.6. : Modèle Numérique de Surface de résolution 2 m/pixel.

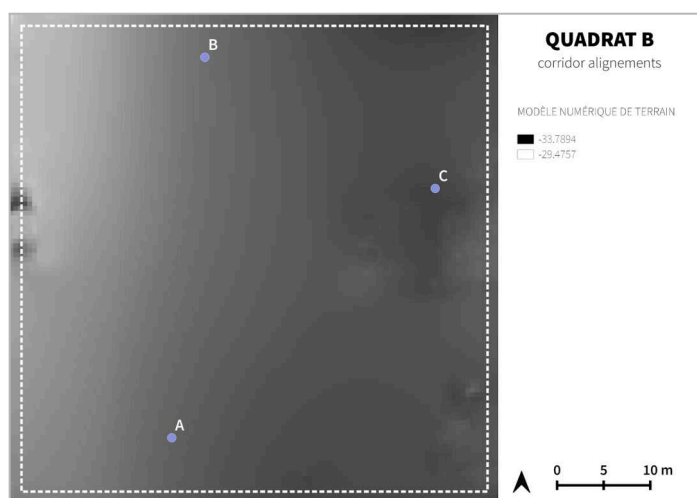


Figure 9.7. : Modèle Numérique de Terrain et localisation des 3 points aléatoirement sélectionnés pour l'indicateur de topographie.

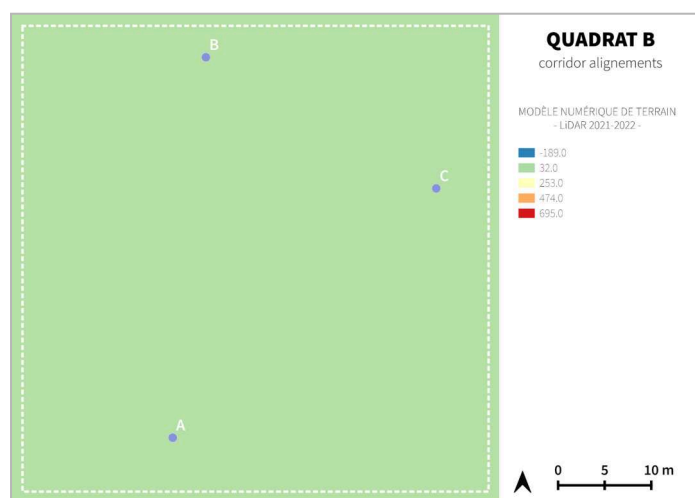


Figure 9.8. : Modèle Numérique de Terrain généré à partir des données LiDAR 2021 et localisation des 3 points aléatoirement sélectionnés pour l'indicateur de topographie.

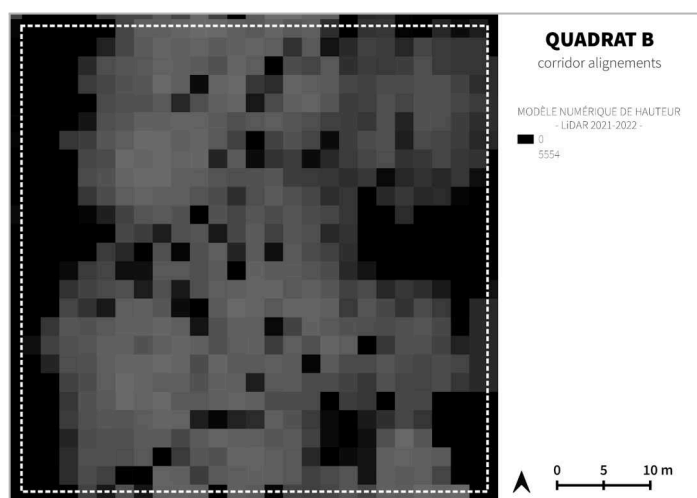


Figure 9.9. : Modèle Numérique de Hauteur, généré à partir des données LiDAR 2021.



Figure 9.10. : Carte d'identification de l'arbre sélectionné pour les indicateurs d'aire de couronne et de structure verticale.

Tableau 9.1. Tableau de recensement des espèces d'arbres identifiées à partir d'un inventaire de terrain.

QUADRAT B			
ARBRES	ESPÈCES RECENSÉES	ARBRES	ESPÈCES RECENSÉES
B01	<i>Platanus x hispanica</i> Mill.	B08	<i>Platanus x hispanica</i> Mill.
B02	<i>Platanus x hispanica</i> Mill.	B09	<i>Platanus x hispanica</i> Mill.
B03	<i>Platanus x hispanica</i> Mill.	B10	<i>Platanus x hispanica</i> Mill.
B04	<i>Platanus x hispanica</i> Mill.	B11	<i>Platanus x hispanica</i> Mill.
B05	<i>Platanus x hispanica</i> Mill.	B12	<i>Platanus x hispanica</i> Mill.
B06	<i>Platanus x hispanica</i> Mill.	B13	<i>Platanus x hispanica</i> Mill.
B07	<i>Platanus x hispanica</i> Mill.	B14	<i>Platanus x hispanica</i> Mill.

ANNEXE 10 : Ensemble des cartographies et des données générées pour le quadrat C, lors de l'étude quantitative. Production personnelle.

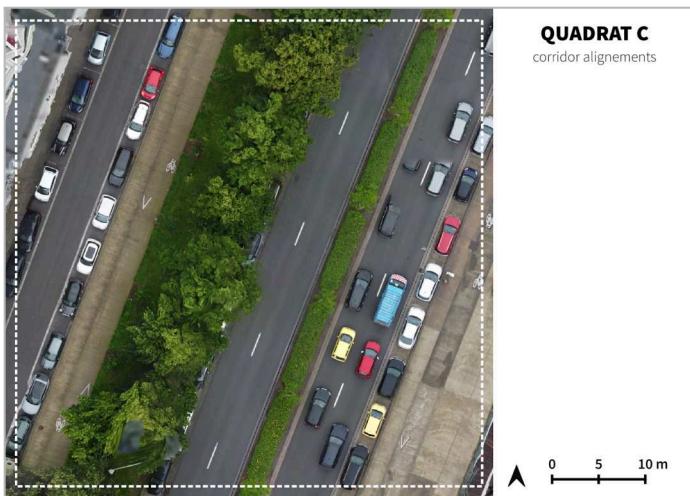


Figure 10.1 : Orthomosaïque.

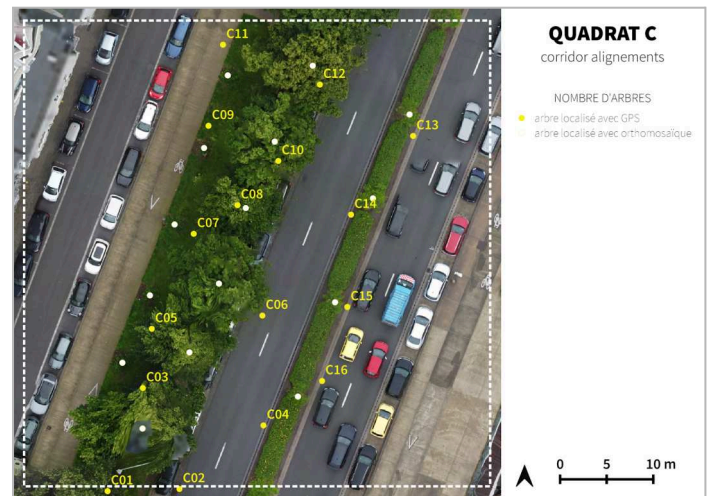


Figure 10.2 : Carte de comparaison du nombre d'arbres identifiés à l'aide de l'orthomosaïque et du MNS générés à partir des données drone et du GPS Garmin.

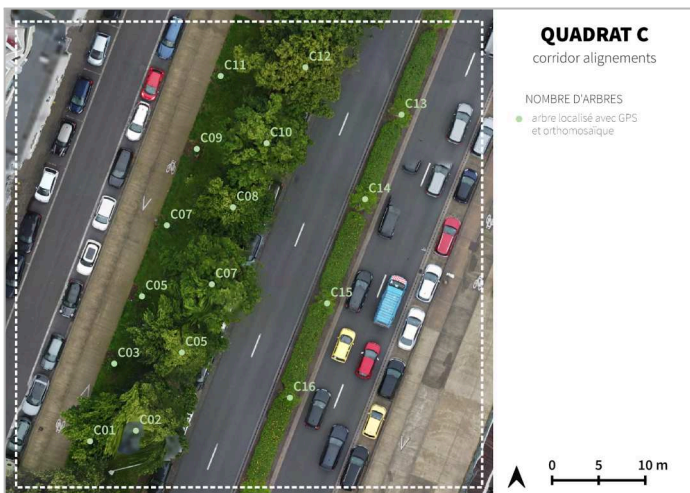


Figure 10.3 : Carte du nombre d'arbres identifiés à l'aide de l'orthomosaïque générée à partir des données drone et du GPS Garmin.

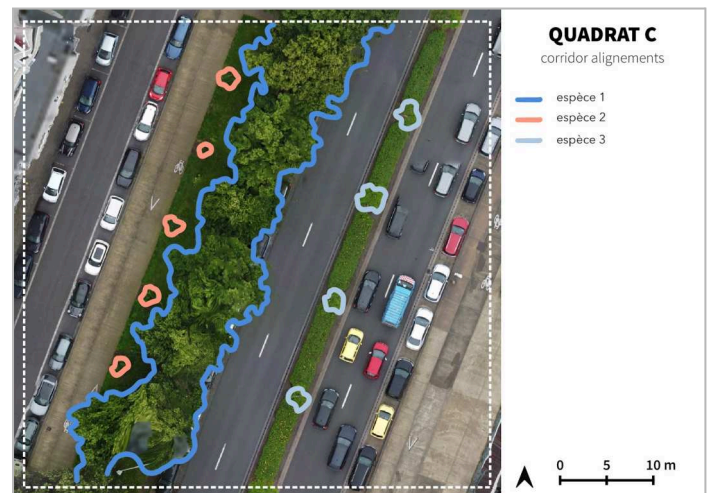


Figure 10.4 : Carte du nombre d'espèces d'arbres identifiées via des observations de l'orthomosaïque générée à partir des données drone.

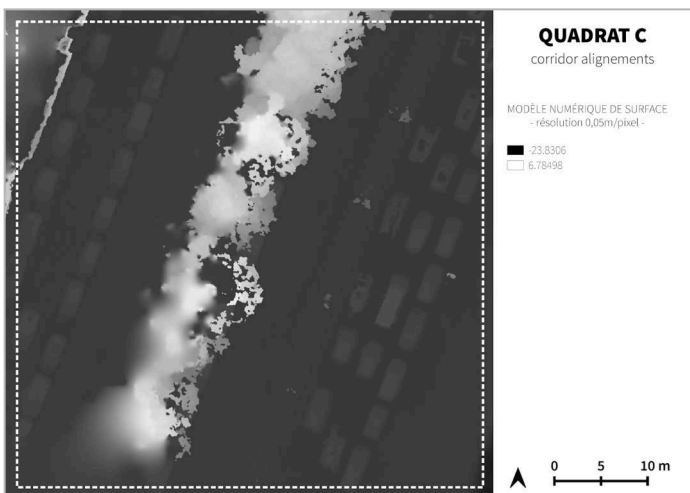


Figure 10.5 : Modèle Numérique de Surface de résolution 0,05 m/pixel

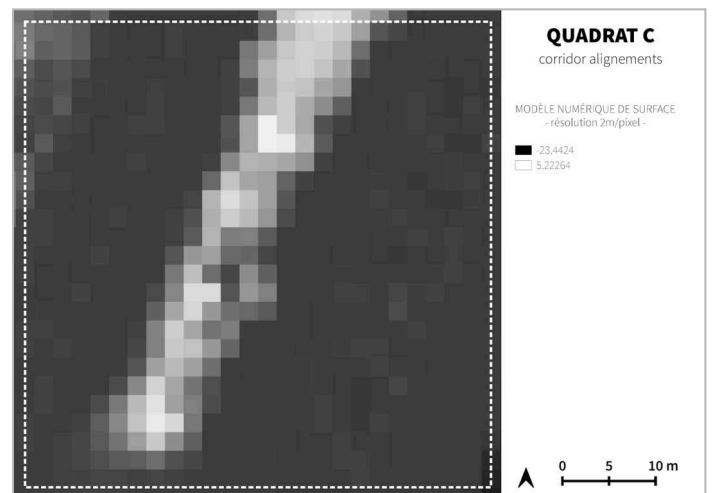


Figure 10.6 : Modèle Numérique de Surface de résolution 2 m/pixel.

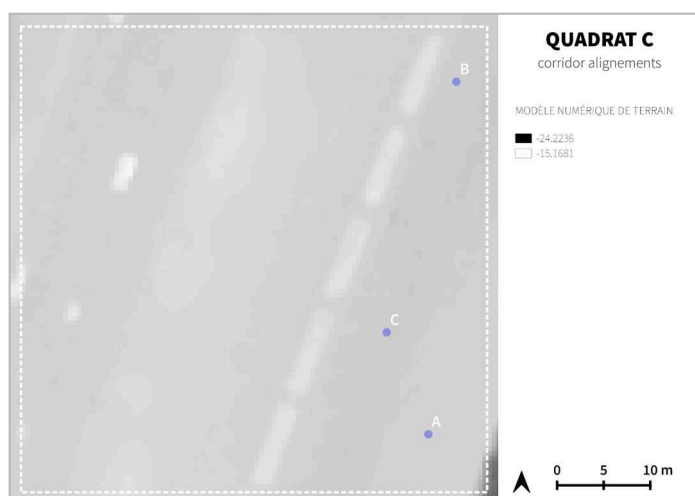


Figure 10.7. : Modèle Numérique de Terrain et localisation des 3 points aléatoirement sélectionnés pour l'indicateur de topographie.

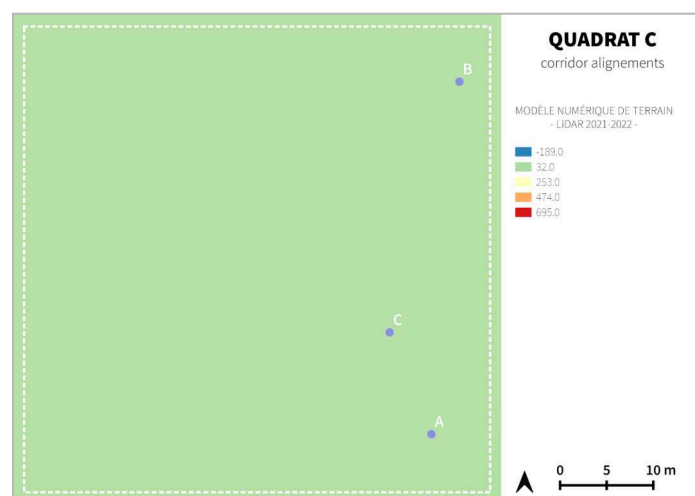


Figure 10.8. : Modèle Numérique de Terrain généré à partir des données LiDAR 2021 et localisation des 3 points aléatoirement sélectionnés pour l'indicateur de topographie.

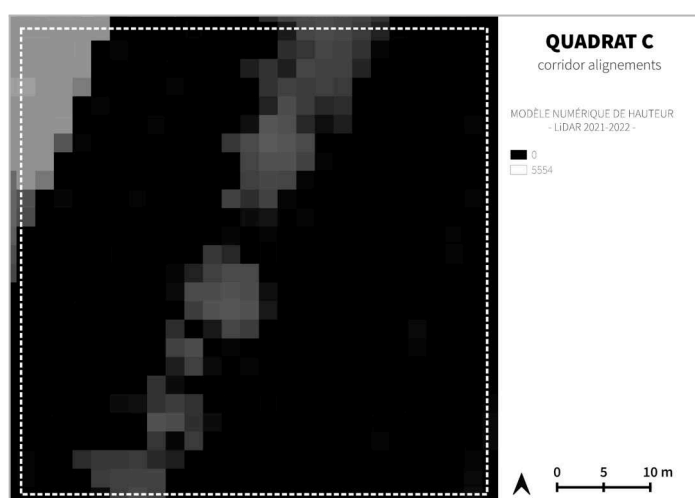


Figure 10.9. : Modèle Numérique de Hauteur, généré à partir des données LiDAR 2021.

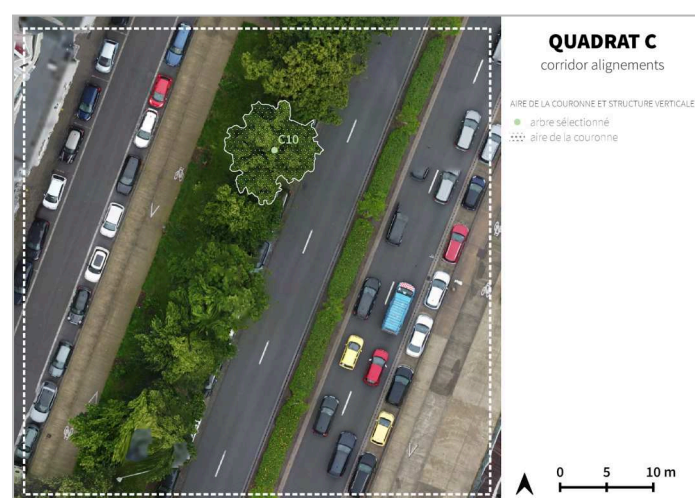


Figure 10.10. : Carte d'identification de l'arbre sélectionné pour les indicateurs d'aire de couronne et de structure verticale.

Tableau 10.1. Tableau de recensement des espèces d'arbres identifiées à partir d'un inventaire de terrain.

QUADRAT C			
ARBRES	ESPÈCES RECENSÉES	ARBRES	ESPÈCES RECENSÉES
C01	<i>Corylus colurna</i> L.	C09	<i>Corylus colurna</i> L.
C02	<i>Tilia x europaea</i> L.	C10	<i>Tilia x europaea</i> L.
C03	<i>Corylus colurna</i> L.	C11	<i>Corylus colurna</i> L.
C04	<i>Tilia x europaea</i> L.	C12	<i>Tilia x europaea</i> L.
C05	<i>Corylus colurna</i> L.	C13	<i>Gleditsia triacanthos</i> L.
C06	<i>Tilia x europaea</i> L.	C14	<i>Gleditsia triacanthos</i> L.
C07	<i>Corylus colurna</i> L.	C15	<i>Gleditsia triacanthos</i> L.
C08	<i>Tilia x europaea</i> L.	C16	<i>Gleditsia triacanthos</i> L.

ANNEXE 11 : Ensemble des cartographies et des données générées pour le quadrat D, lors de l'étude quantitative. Production personnelle.

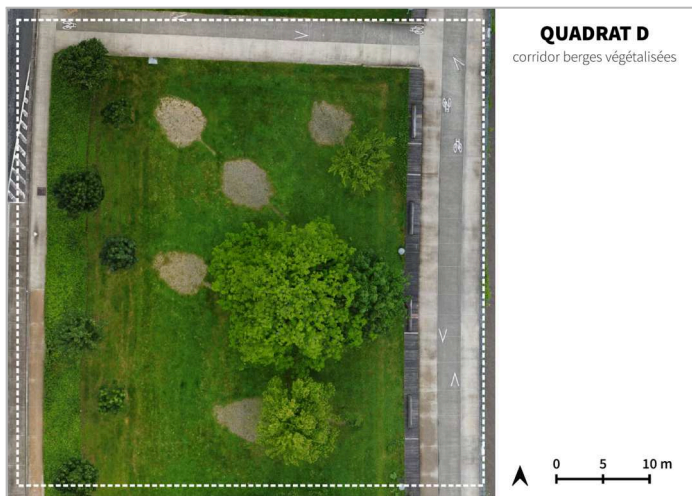


Figure 11.1. : Orthomosaïque.



Figure 11.2. : Carte de comparaison du nombre d'arbres identifiés à l'aide de l'orthomosaïque et du MNS générés à partir des données drone et du GPS Garmin.



Figure 11.3. : Carte du nombre d'arbres identifiés à l'aide de l'orthomosaïque générée à partir des données drone et du GPS Garmin.

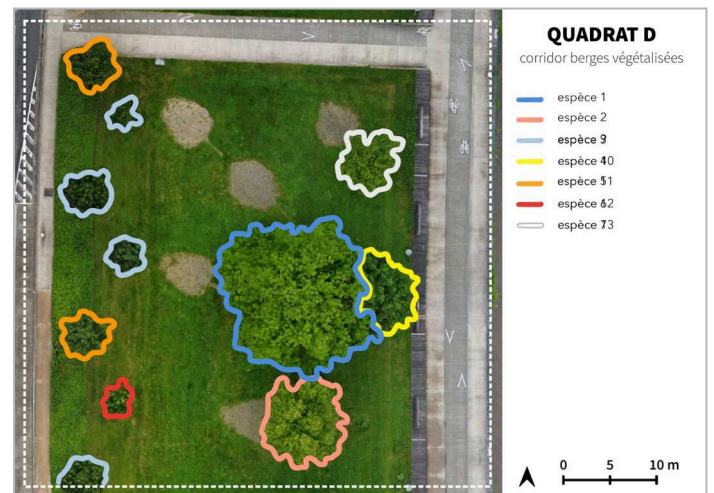


Figure 11.4. : Carte du nombre d'espèces d'arbres identifiées via des observations de l'orthomosaïque générée à partir des données drone.

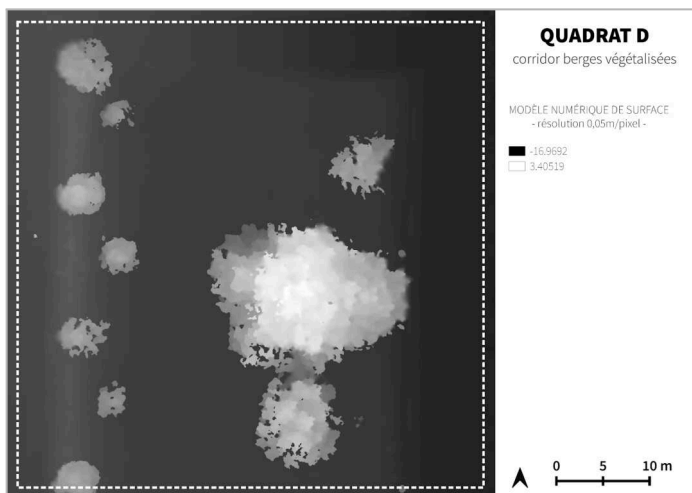


Figure 11.5. : Modèle Numérique de Surface de résolution 0,05 m/pixel

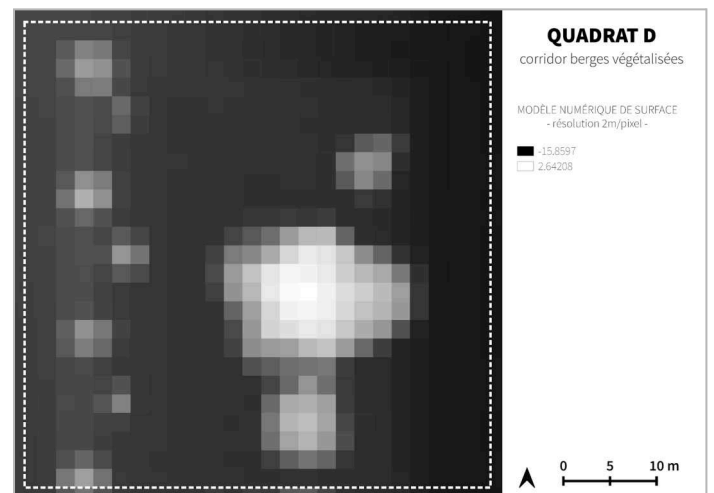


Figure 11.6. : Modèle Numérique de Surface de résolution 2 m/pixel.

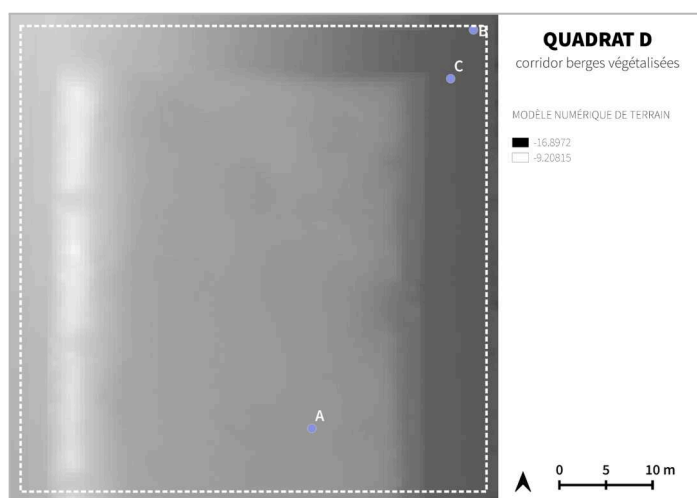


Figure 11.7. : Modèle Numérique de Terrain et localisation des 3 points aléatoirement sélectionnés pour l'indicateur de topographie.

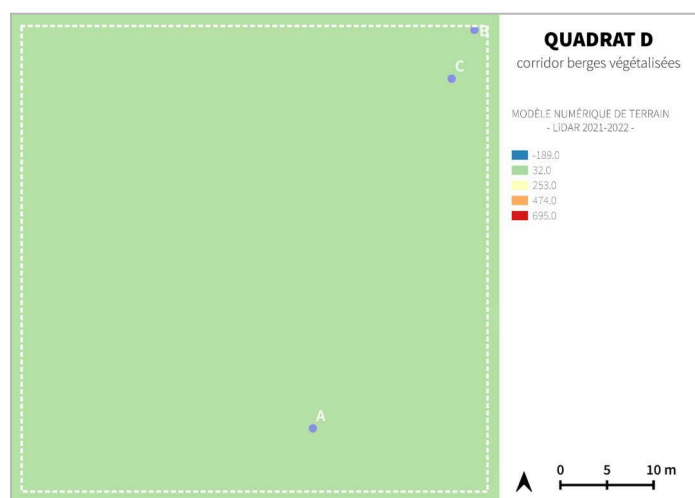


Figure 11.8. : Modèle Numérique de Terrain généré à partir des données LiDAR 2021 et localisation des 3 points aléatoirement sélectionnés pour l'indicateur de topographie.

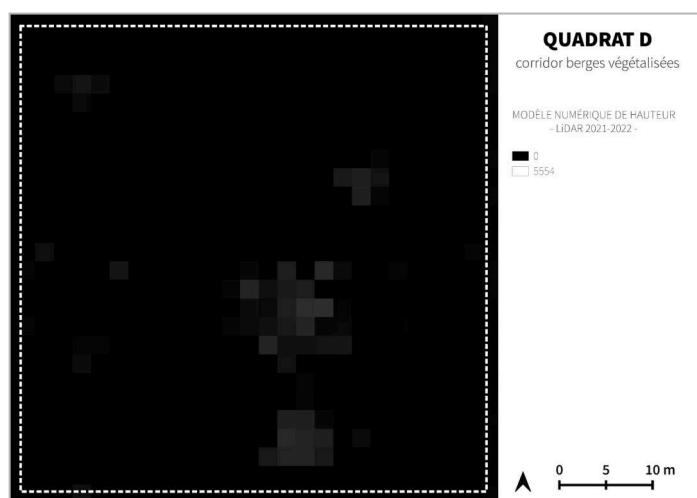


Figure 11.9. : Modèle Numérique de Hauteur, généré à partir des données LiDAR 2021.



Figure 11.10. : Carte d'identification de l'arbre sélectionné pour les indicateurs d'aire de couronne et de structure verticale.

Tableau 11.1. Tableau de recensement des espèces d'arbres identifiées à partir d'un inventaire de terrain.

QUADRAT D			
ARBRES	ESPÈCES RECENSÉES	ARBRES	ESPÈCES RECENSÉES
D01	<i>Acer monspessulanum</i> L.	D08	<i>Liquidambar orientalis</i> Mill.
D02	<i>Fraxinus pennsylvanica</i> Marshall	D09	<i>Quercus palustris</i> Münchh.
D03	<i>Fraxinus angustifolia</i> Vahl	D10	<i>Pterocarya fraxinifolia</i> (Poir.) Spach
D04	<i>Acer saccharum</i> Marshall	D11	<i>Liquidambar orientalis</i> Mill.
D05	<i>Acer campestre</i> L.	D12	<i>Juglans nigra</i> L.
D06	<i>Fraxinus americana</i> L.	D13	<i>Quercus rubra</i> L.
D07	<i>Fraxinus angustifolia</i> Vahl	D14	<i>Ginkgo biloba</i> L.

ANNEXE 12 : Ensemble des cartographies et des données générées pour le quadrat E, lors de l'étude quantitative. Production personnelle.

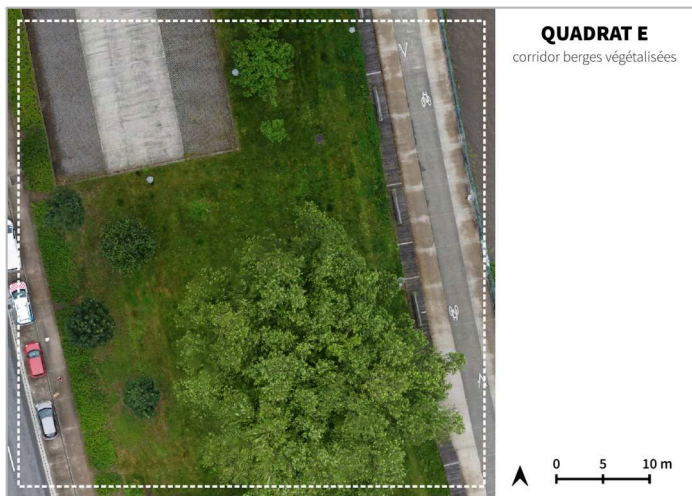


Figure 12.1. : Orthomosaïque.



Figure 12.2. : Carte de comparaison du nombre d'arbres identifiés à l'aide de l'orthomosaïque et du MNS générés à partir des données drone et du GPS Garmin.



Figure 12.3. : Carte du nombre d'arbres identifiés à l'aide de l'orthomosaïque générée à partir des données drone et du GPS Garmin.

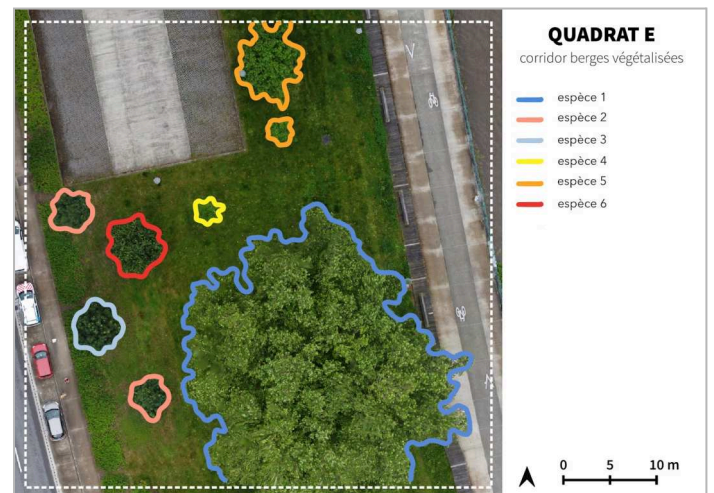


Figure 12.4. : Carte du nombre d'espèces d'arbres identifiées via des observations de l'orthomosaïque générée à partir des données drone.

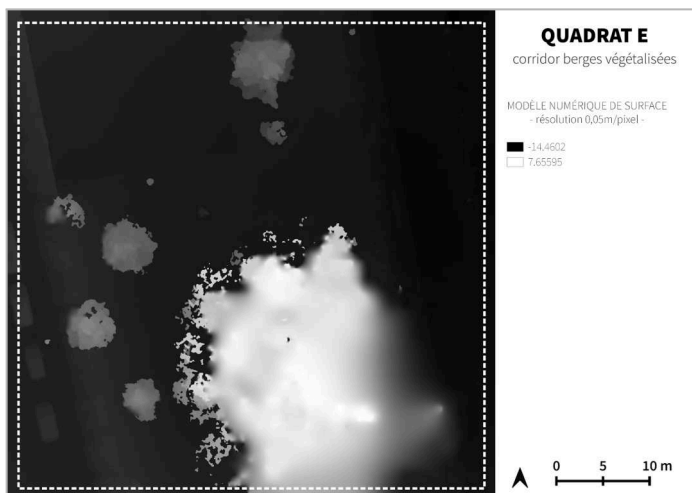


Figure 12.5. : Modèle Numérique de Surface de résolution 0,05 m/pixel

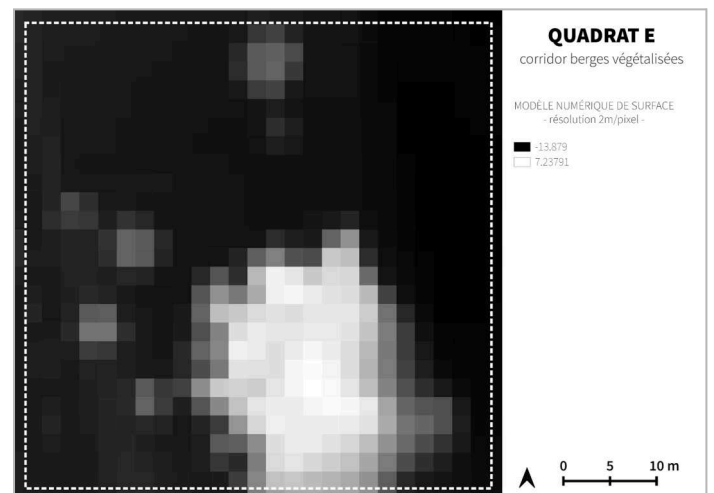


Figure 12.6. : Modèle Numérique de Surface de résolution 2 m/pixel.

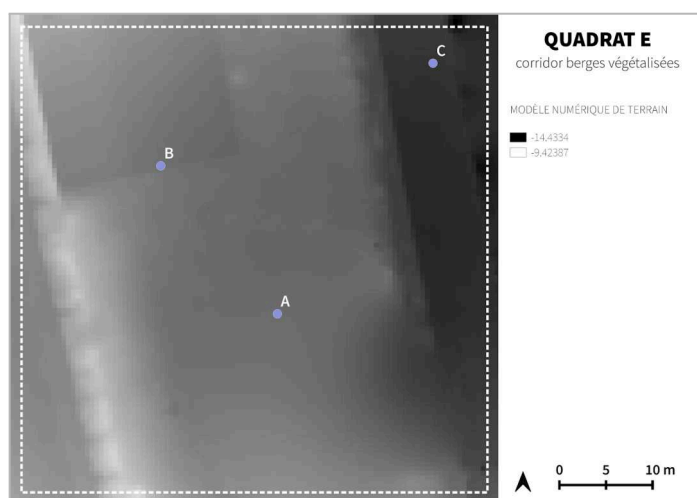


Figure 12.7. : Modèle Numérique de Terrain et localisation des 3 points aléatoirement sélectionnés pour l'indicateur de topographie.

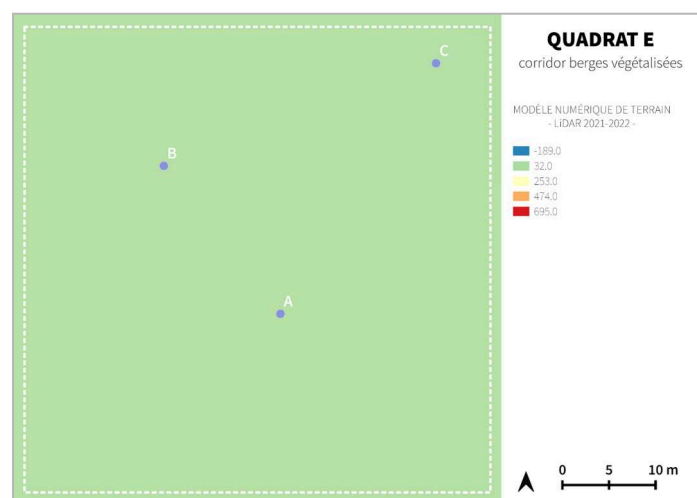


Figure 12.8. : Modèle Numérique de Terrain généré à partir des données LiDAR 2021 et localisation des 3 points aléatoirement sélectionnés pour l'indicateur de topographie.

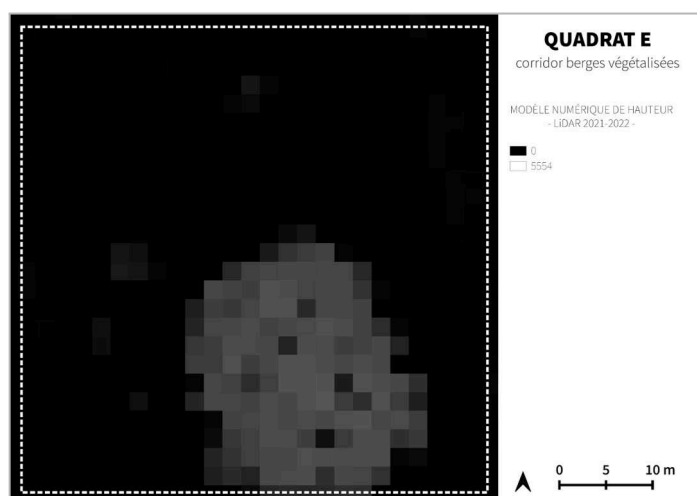


Figure 12.9. : Modèle Numérique de Hauteur, généré à partir des données LiDAR 2021.

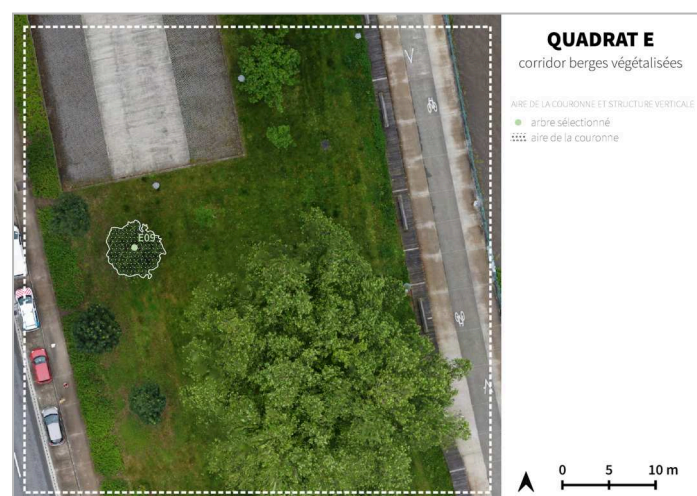


Figure 12.10. : Carte d'identification de l'arbre sélectionné pour les indicateurs d'aire de couronne et de structure verticale.

Tableau 12.1. Tableau de recensement des espèces d'arbres identifiées à partir d'un inventaire de terrain.

QUADRAT E			
ARBRES	ESPÈCES RECENSÉES	ARBRES	ESPÈCES RECENSÉES
E01	<i>Platanus x hispanica</i> Mill.	E08	<i>Fraxinus americana</i> L.
E02	<i>Platanus x hispanica</i> Mill.	E09	<i>Acer campestre</i> L.
E03	<i>Platanus x hispanica</i> Mill.	E10	<i>Quercus phellos</i> L.
E04	<i>Platanus x hispanica</i> Mill.	E11	<i>Catalpa ovata</i> G. Don.
E05	<i>Platanus x hispanica</i> Mill.	E12	<i>Catalpa ovata</i> G. Don.
E06	<i>Fraxinus americana</i> L.	E13	<i>Platanus x hispanica</i> Mill.
E07	<i>Acer platanoides</i> L.	E14	<i>Platanus x hispanica</i> Mill.

ANNEXE 13 : Ensemble des cartographies et des données générées pour le quadrat F, lors de l'étude quantitative. Production personnelle.



Figure 13.1. : Orthomosaïque.



Figure 13.2. : Carte de comparaison du nombre d'arbres identifiés à l'aide de l'orthomosaïque et du MNS générés à partir des données drone et du GPS Garmin.



Figure 13.3. : Carte du nombre d'arbres identifiés à l'aide de l'orthomosaïque générée à partir des données drone et du GPS Garmin.

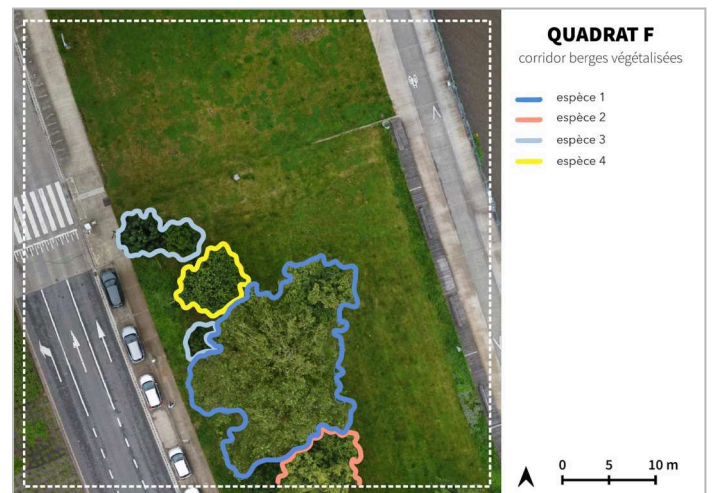


Figure 13.4. : Carte du nombre d'espèces d'arbres identifiées via des observations de l'orthomosaïque générée à partir des données drone.

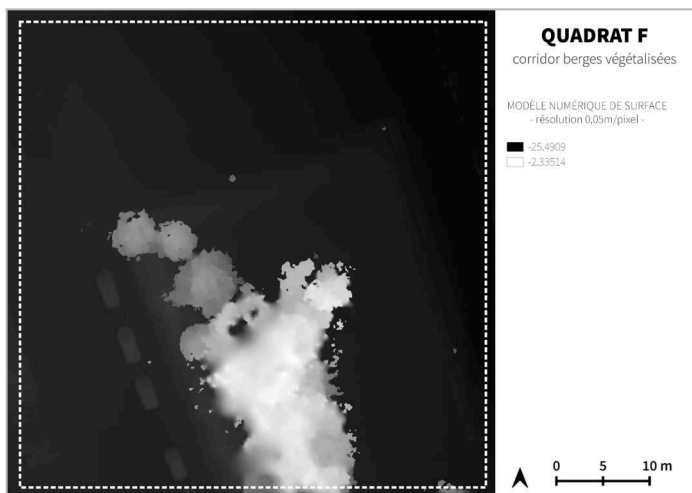


Figure 13.5. : Modèle Numérique de Surface de résolution 0,05 m/pixel

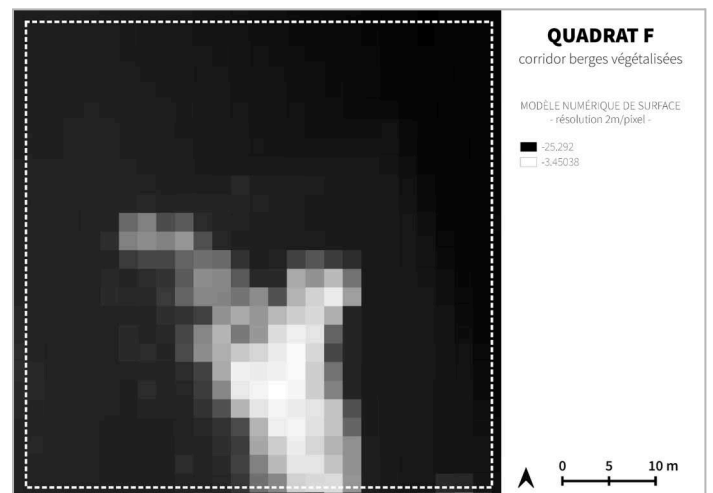


Figure 13.6. : Modèle Numérique de Surface de résolution 2 m/pixel.

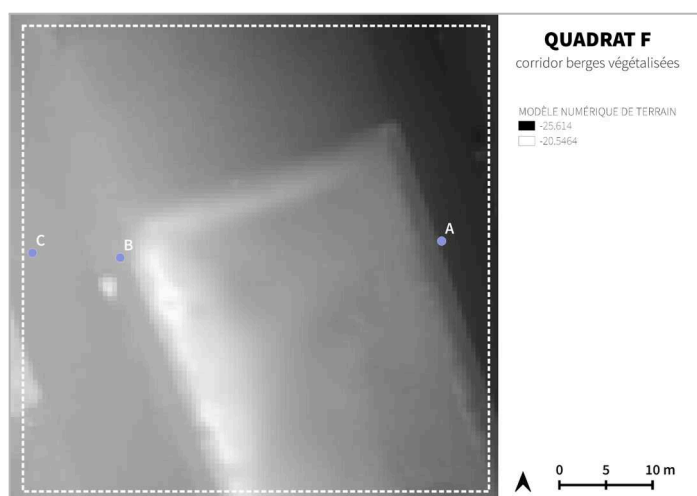


Figure 13.7. : Modèle Numérique de Terrain et localisation des 3 points aléatoirement sélectionnés pour l'indicateur de topographie.

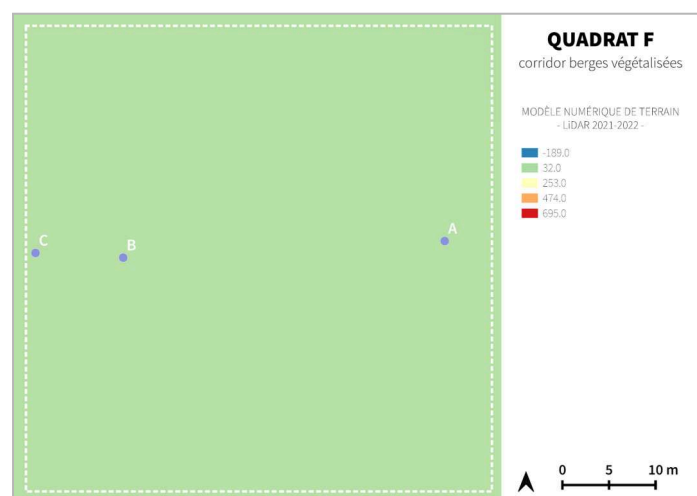


Figure 13.8. : Modèle Numérique de Terrain généré à partir des données LiDAR 2021 et localisation des 3 points aléatoirement sélectionnés pour l'indicateur de topographie.

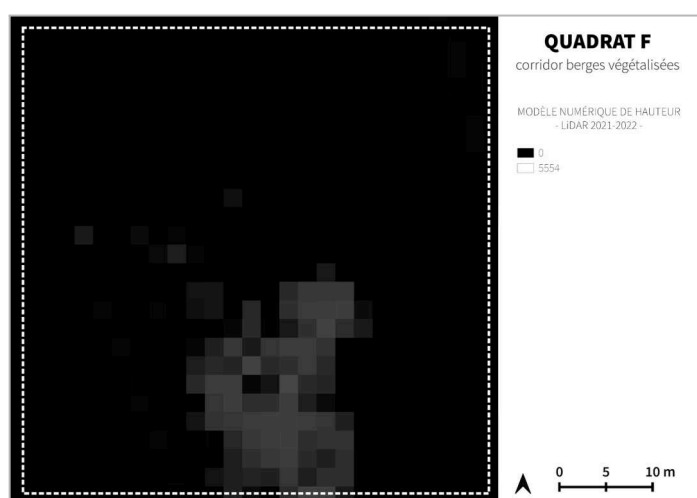


Figure 13.9. : Modèle Numérique de Hauteur, généré à partir des données LiDAR 2021.

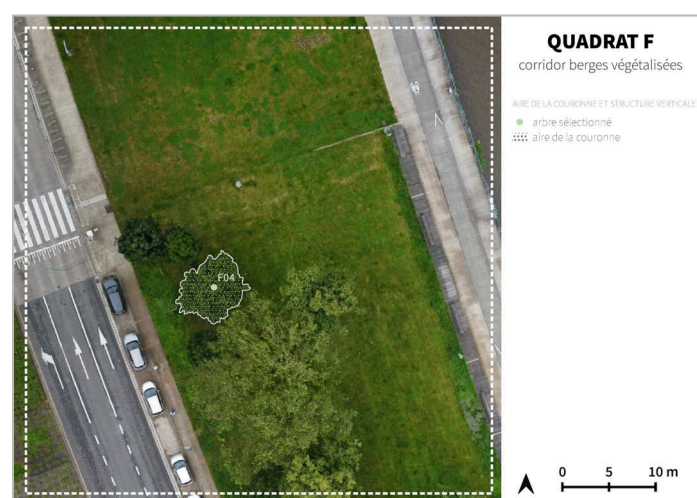


Figure 13.10. : Carte d'identification de l'arbre sélectionné pour les indicateurs d'aire de couronne et de structure verticale.

Tableau 13.1. Tableau de recensement des espèces d'arbres identifiées à partir d'un inventaire de terrain.

QUADRAT F			
ARBRES	ESPÈCES RECENSÉES	ARBRES	ESPÈCES RECENSÉES
F01	<i>Acer saccharum</i> Marshall	F07	<i>Platanus occidentalis</i> L.
F02	<i>Fraxinus angustifolia</i> Vahl	F08	<i>Platanus occidentalis</i> L.
F03	<i>Quercus phellos</i> L.	F09	<i>Platanus occidentalis</i> L.
F04	<i>Acer campestre</i> L.	F10	<i>Tilia x europaea</i> L.
F05	<i>Fraxinus angustifolia</i> Vahl	F11	<i>Tilia x europaea</i> L.
F06	<i>Quercus phellos</i> L.		

ANNEXE 14 : Ensemble des cartographies et des données générées pour le quadrat G, lors de l'étude quantitative. Production personnelle.



Figure 14.1. : Orthomosaïque.

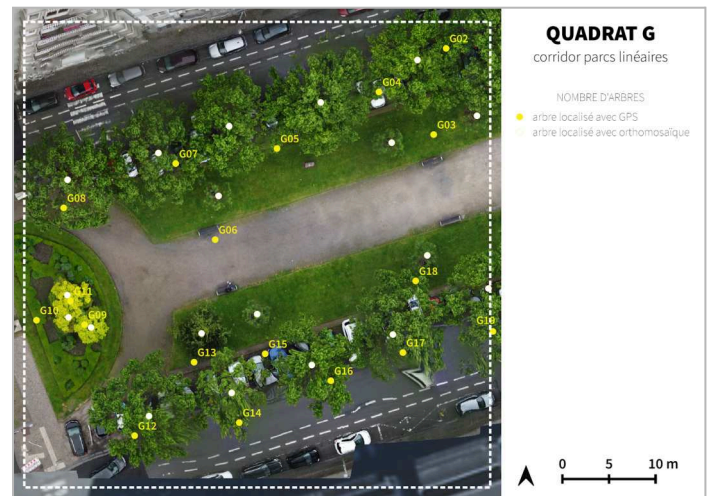


Figure 14.2. : Carte de comparaison du nombre d'arbres identifiés à l'aide de l'orthomosaïque et du MNS générés à partir des données drone et du GPS Garmin.



Figure 14.3. : Carte du nombre d'arbres identifiés à l'aide de l'orthomosaïque générée à partir des données drone et du GPS Garmin.

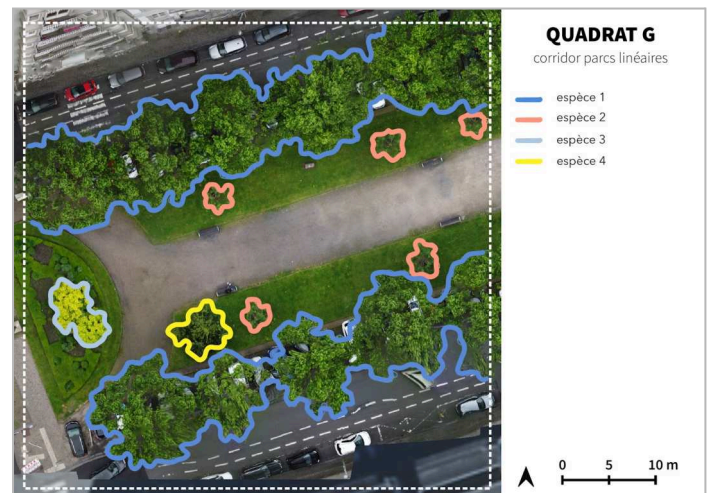


Figure 14.4. : Carte du nombre d'espèces d'arbres identifiées via des observations de l'orthomosaïque générée à partir des données drone.

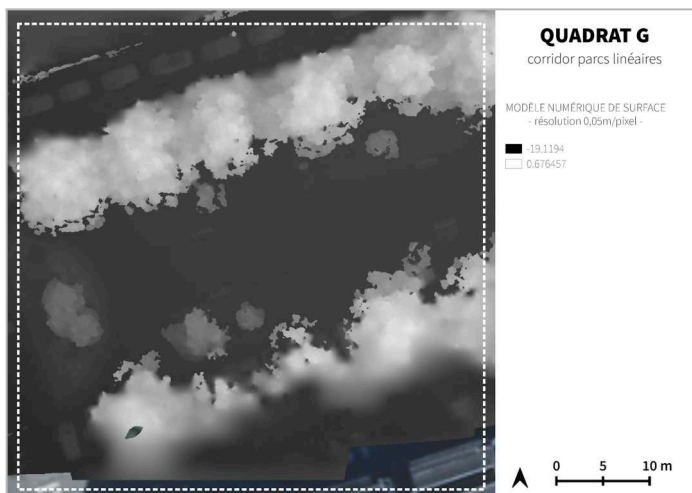


Figure 14.5. : Modèle Numérique de Surface de résolution 0,05 m/pixel

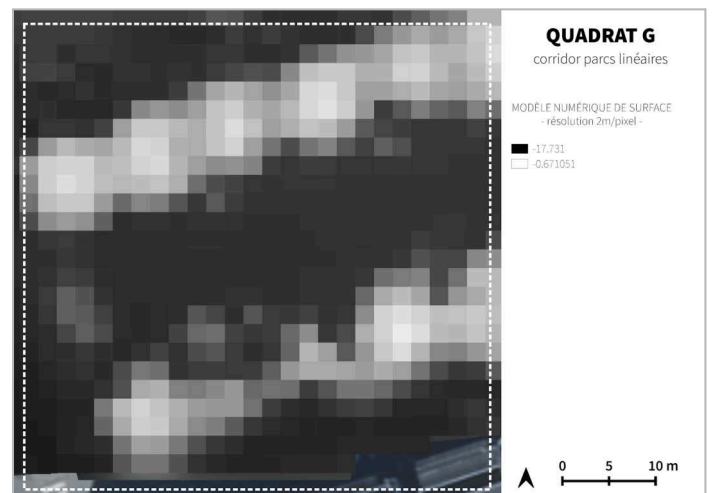


Figure 14.6. : Modèle Numérique de Surface de résolution 2 m/pixel.

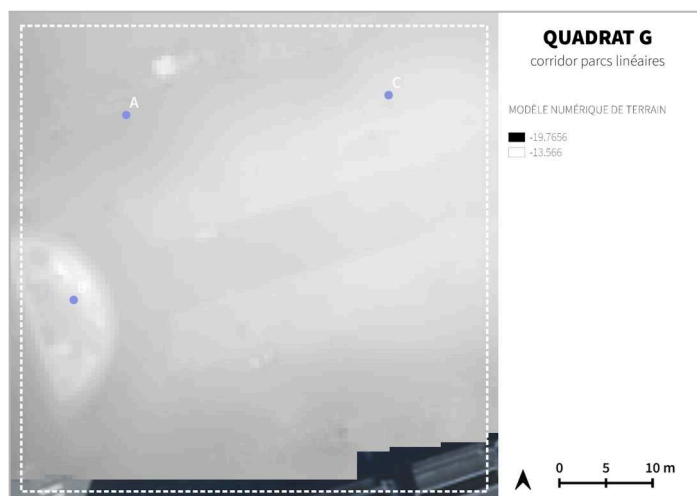


Figure 14.7. : Modèle Numérique de Terrain et localisation des 3 points aléatoirement sélectionnés pour l'indicateur de topographie.

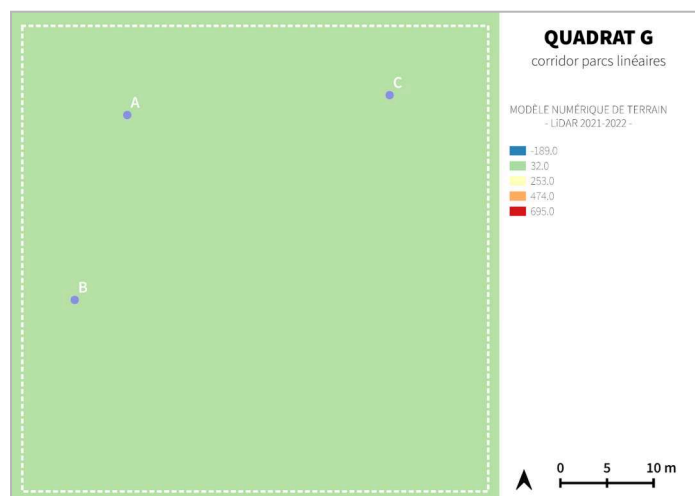


Figure 14.8. : Modèle Numérique de Terrain généré à partir des données LiDAR 2021 et localisation des 3 points aléatoirement sélectionnés pour l'indicateur de topographie.

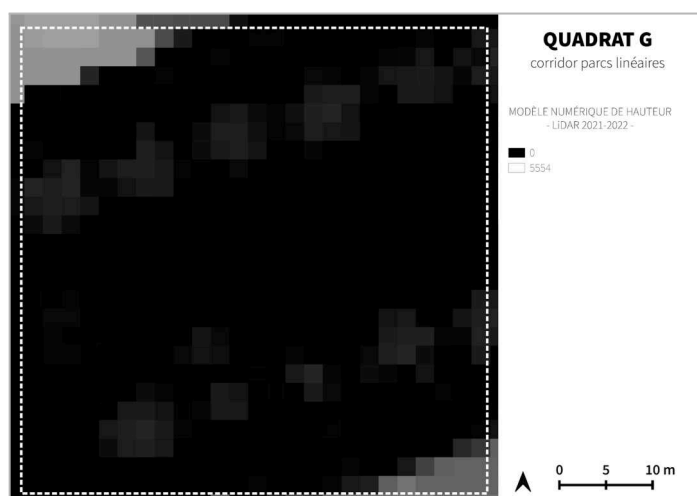


Figure 14.9. : Modèle Numérique de Hauteur, généré à partir des données LiDAR 2021.

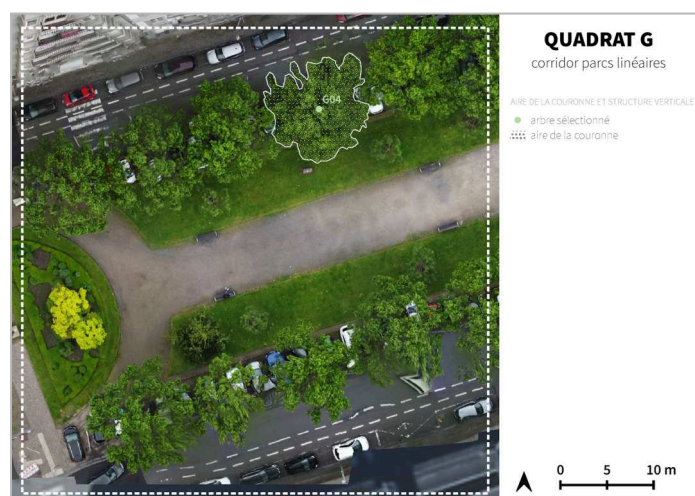


Figure 14.10. : Carte d'identification de l'arbre sélectionné pour les indicateurs d'aire de couronne et de structure verticale.

Tableau 14.1. Tableau de recensement des espèces d'arbres identifiées à partir d'un inventaire de terrain.

QUADRAT G			
ARBRES	ESPÈCES RECENSÉES	ARBRES	ESPÈCES RECENSÉES
G01	<i>Styphnolobium japonicum</i> L. Schott	G11	<i>Catalpa bignonioides</i> Walter
G02	<i>Platanus occidentalis</i> L.	G12	<i>Platanus occidentalis</i> L.
G03	<i>Styphnolobium japonicum</i> L. Schott	G13	<i>Chamaecyparis lawsoniana</i>
G04	<i>Platanus occidentalis</i> L.	G14	<i>Platanus occidentalis</i> L.
G05	<i>Platanus occidentalis</i> L.	G15	<i>Styphnolobium japonicum</i> L. Schott
G06	<i>Styphnolobium japonicum</i> L. Schott	G16	<i>Platanus occidentalis</i> L.
G07	<i>Platanus occidentalis</i> L.	G17	<i>Platanus occidentalis</i> L.
G08	<i>Platanus occidentalis</i> L.	G18	<i>Styphnolobium japonicum</i> L. Schott
G09	<i>Catalpa bignonioides</i> Walter	G19	<i>Platanus occidentalis</i> L.
G10	<i>Catalpa bignonioides</i> Walter		

ANNEXE 15 : Ensemble des cartographies et des données générées pour le quadrat H, lors de l'étude quantitative. Production personnelle.

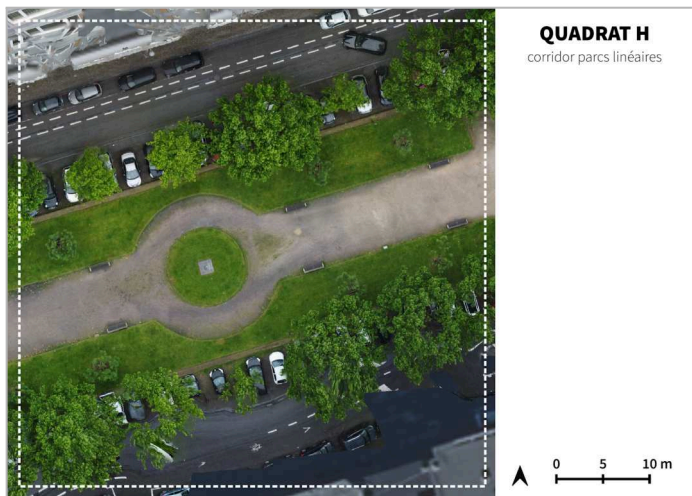


Figure 15.1 : Orthomosaïque.

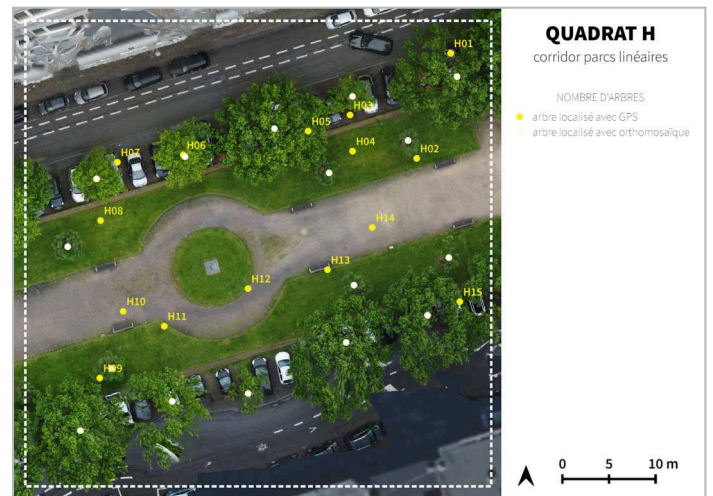


Figure 15.2 : Carte de comparaison du nombre d'arbres identifiés à l'aide de l'orthomosaïque et du MNS générés à partir des données drone et du GPS Garmin.

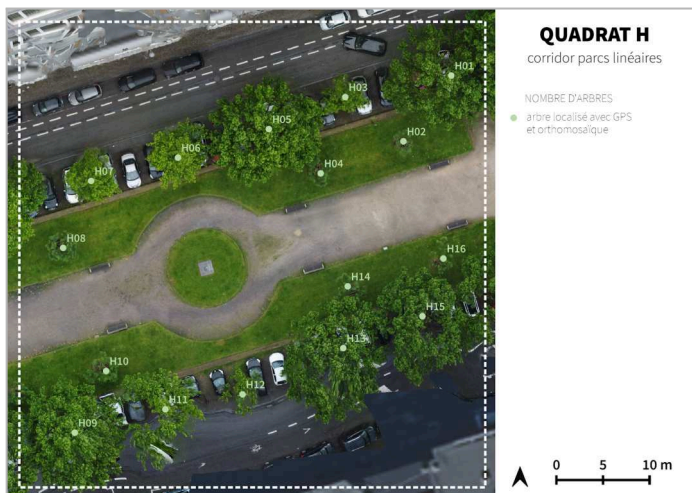


Figure 15.3 : Carte du nombre d'arbres identifiés à l'aide de l'orthomosaïque générée à partir des données drone et du GPS Garmin.

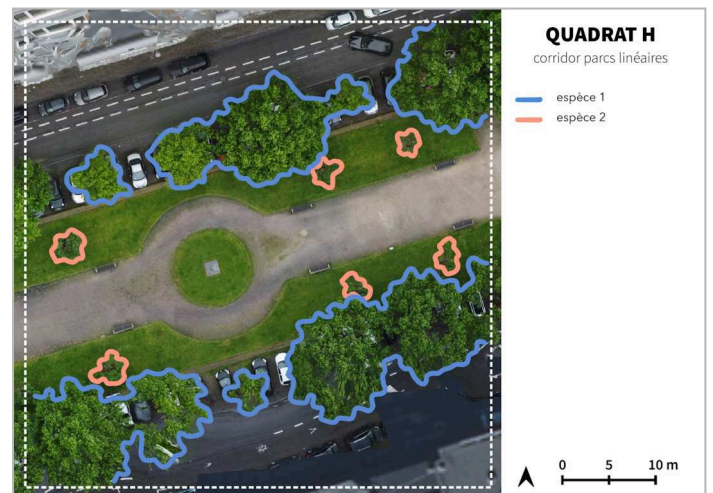


Figure 15.4 : Carte du nombre d'espèces d'arbres identifiées via des observations de l'orthomosaïque générée à partir des données drone.

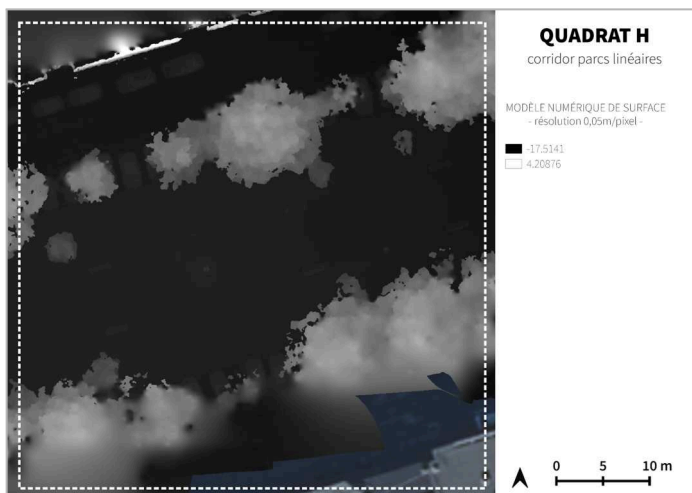


Figure 15.5 : Modèle Numérique de Surface de résolution 0,05 m/pixel

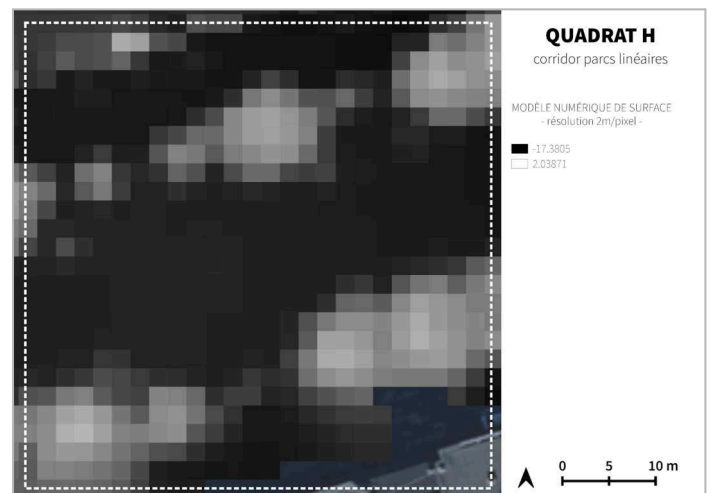


Figure 15.6 : Modèle Numérique de Surface de résolution 2 m/pixel.

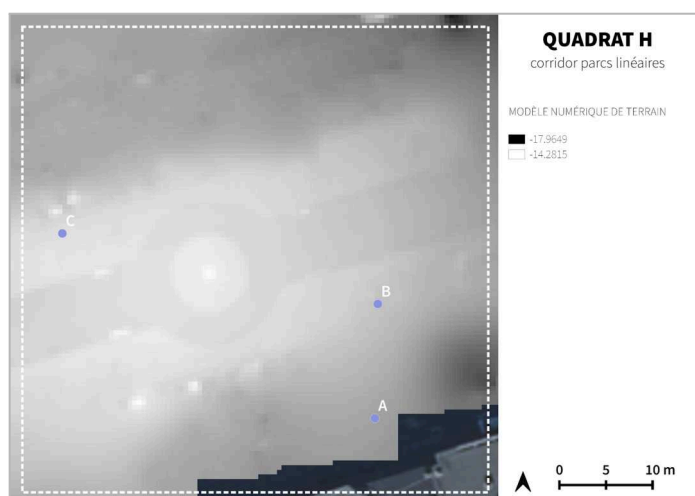


Figure 15.7. : Modèle Numérique de Terrain et localisation des 3 points aléatoirement sélectionnés pour l'indicateur de topographie.

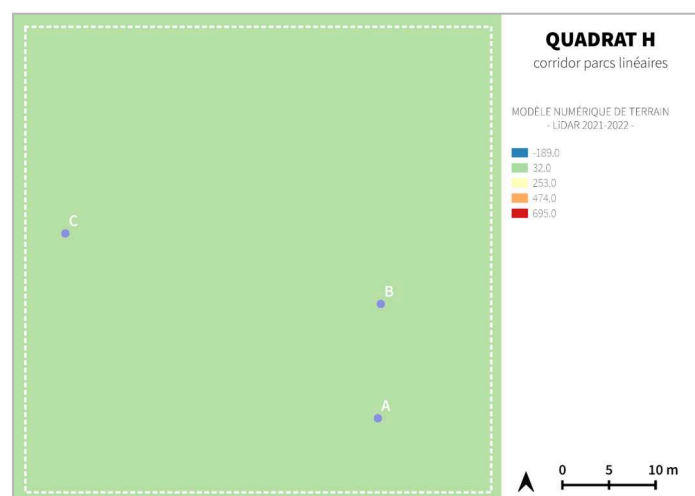


Figure 15.8. : Modèle Numérique de Terrain généré à partir des données LiDAR 2021 et localisation des 3 points aléatoirement sélectionnés pour l'indicateur de topographie.

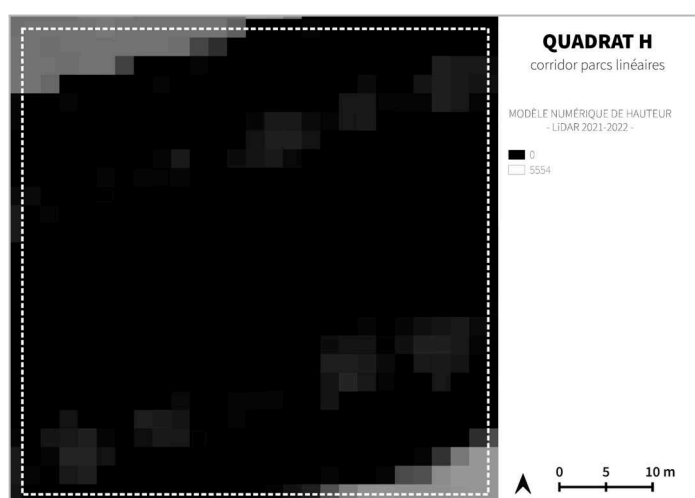


Figure 15.9. : Modèle Numérique de Hauteur, généré à partir des données LiDAR 2021.

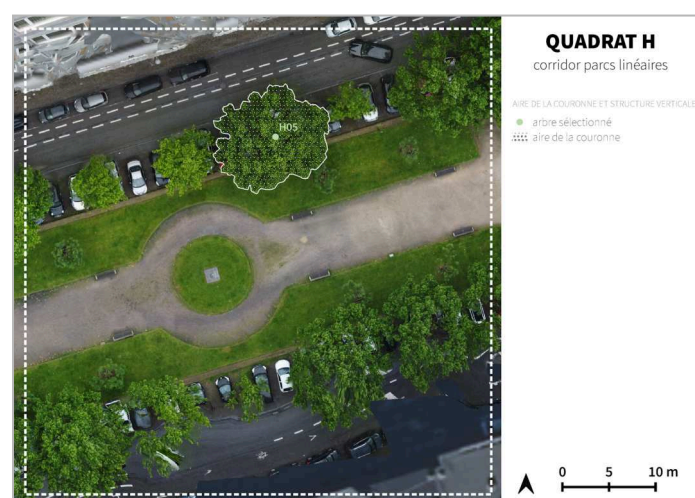


Figure 15.10. : Carte d'identification de l'arbre sélectionné pour les indicateurs d'aire de couronne et de structure verticale.

Tableau 15.1. Tableau de recensement des espèces d'arbres identifiées à partir d'un inventaire de terrain.

QUADRAT H			
ARBRES	ESPÈCES RECENSÉES	ARBRES	ESPÈCES RECENSÉES
H01	<i>Platanus occidentalis</i> L.	H09	<i>Platanus occidentalis</i> L.
H02	<i>Styphnolobium japonicum</i> L. Schott	H10	<i>Styphnolobium japonicum</i> L. Schott
H03	<i>Platanus occidentalis</i> L.	H11	<i>Platanus occidentalis</i> L.
H04	<i>Styphnolobium japonicum</i> L. Schott	H12	<i>Platanus occidentalis</i> L.
H05	<i>Platanus occidentalis</i> L.	H13	<i>Platanus occidentalis</i> L.
H06	<i>Platanus occidentalis</i> L.	H14	<i>Styphnolobium japonicum</i> L. Schott
H07	<i>Platanus occidentalis</i> L.	H15	<i>Platanus occidentalis</i> L.
H08	<i>Styphnolobium japonicum</i> L. Schott	H16	<i>Styphnolobium japonicum</i> L. Schott

ANNEXE 16 : Ensemble des cartographies et des données générées pour le quadrat I, lors de l'étude quantitative. Production personnelle.

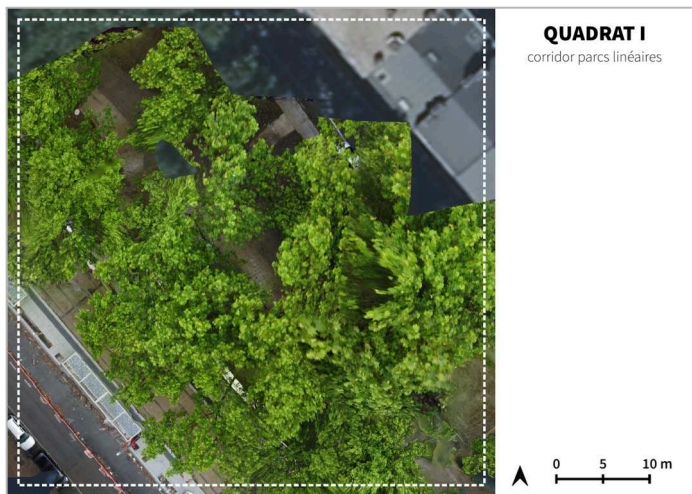


Figure 16.1. : Orthomosaïque.

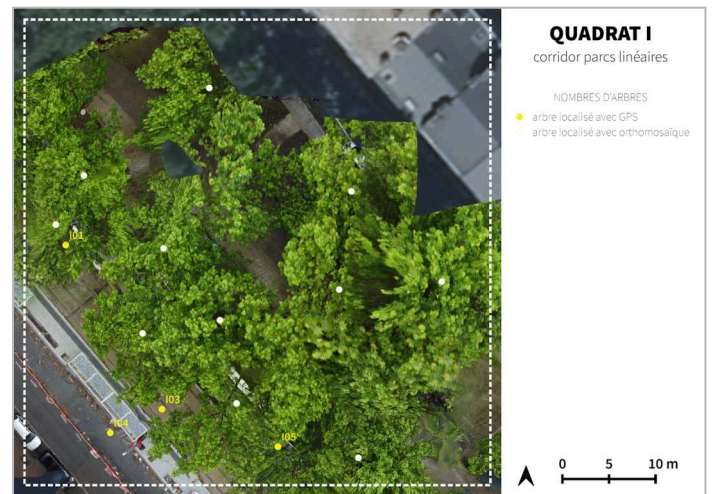


Figure 16.2. : Carte de comparaison du nombre d'arbres identifiés à l'aide de l'orthomosaïque et du MNS générés à partir des données drone et du GPS Garmin.

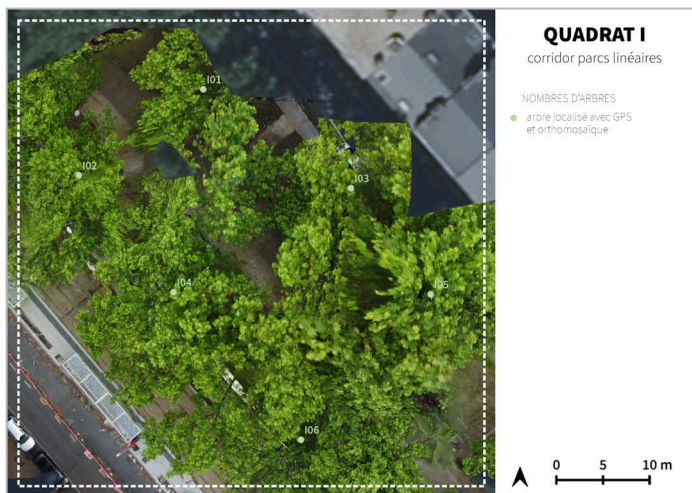


Figure 16.3. : Carte du nombre d'arbres identifiés à l'aide de l'orthomosaïque générée à partir des données drone et du GPS Garmin.

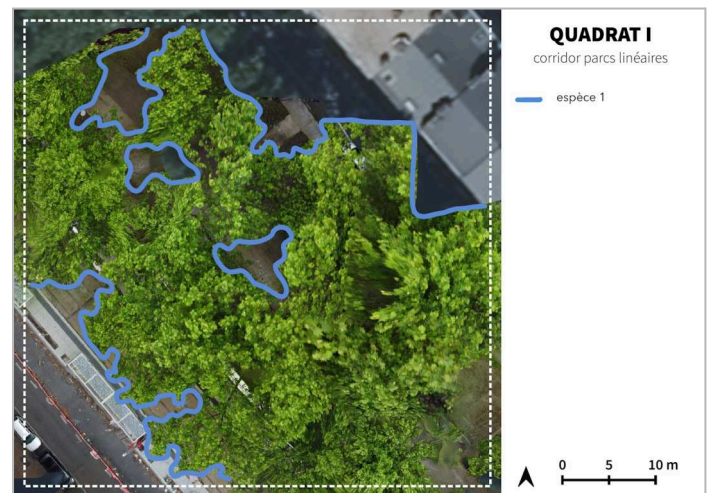


Figure 16.4. : Carte du nombre d'espèces d'arbres identifiées via des observations de l'orthomosaïque générée à partir des données drone.

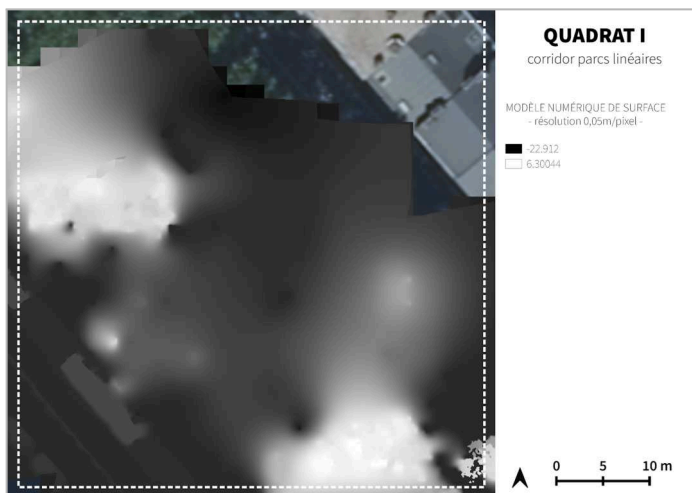


Figure 16.5. : Modèle Numérique de Surface de résolution 0,05 m/pixel

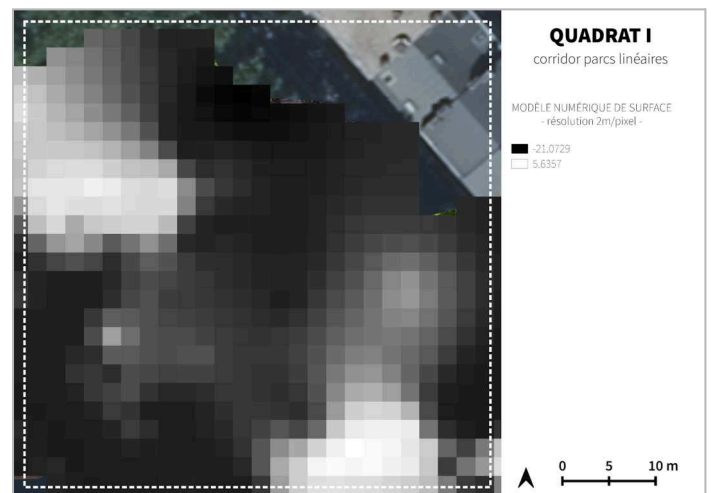


Figure 16.6. : Modèle Numérique de Surface de résolution 2 m/pixel.

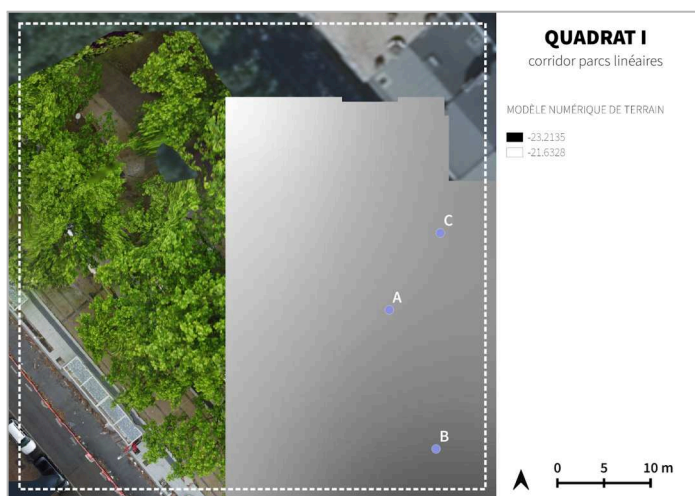


Figure 16.7. : Modèle Numérique de Terrain et localisation des 3 points aléatoirement sélectionnés pour l'indicateur de topographie.

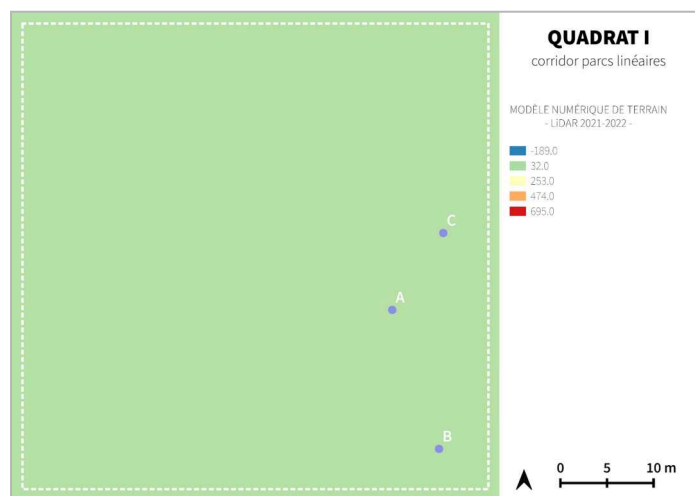


Figure 16.8. : Modèle Numérique de Terrain généré à partir des données LiDAR 2021 et localisation des 3 points aléatoirement sélectionnés pour l'indicateur de topographie.

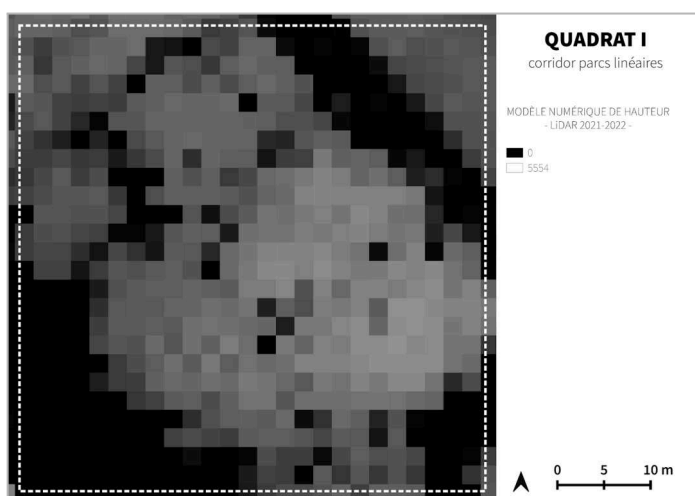


Figure 16.7. : Modèle Numérique de Hauteur, généré à partir des données LiDAR 2021.



Figure 16.8. : Carte d'identification de l'arbre sélectionné pour les indicateurs d'aire de couronne et de structure verticale.

Tableau 16.1. Tableau de recensement des espèces d'arbres identifiées à partir d'un inventaire de terrain.

QUADRAT I			
ARBRES	ESPÈCES RECENSÉES	ARBRES	ESPÈCES RECENSÉES
I01	<i>Platanus x hispanica</i> Mill.	I04	<i>Platanus x hispanica</i> Mill.
I02	<i>Platanus x hispanica</i> Mill.	I05	<i>Platanus x hispanica</i> Mill.
I03	<i>Platanus x hispanica</i> Mill.	I06	<i>Platanus x hispanica</i> Mill.

ANNEXE 17 : Ensemble des cartographies et des données générées pour le quadrat J, lors de l'étude quantitative. Production personnelle.



Figure 17.1. : Orthomosaïque.



Figure 17.2. : Carte de comparaison du nombre d'arbres identifiés à l'aide de l'orthomosaïque et du MNS générés à partir des données drone et du GPS Garmin.

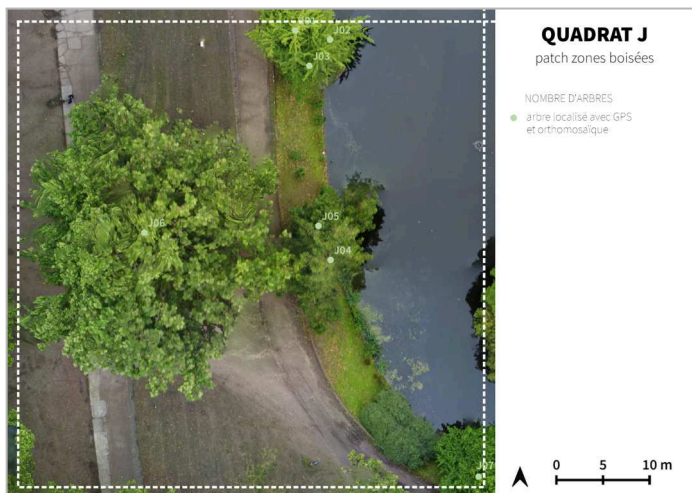


Figure 17.3. : Carte du nombre d'arbres identifiés à l'aide de l'orthomosaïque générée à partir des données drone et du GPS Garmin.

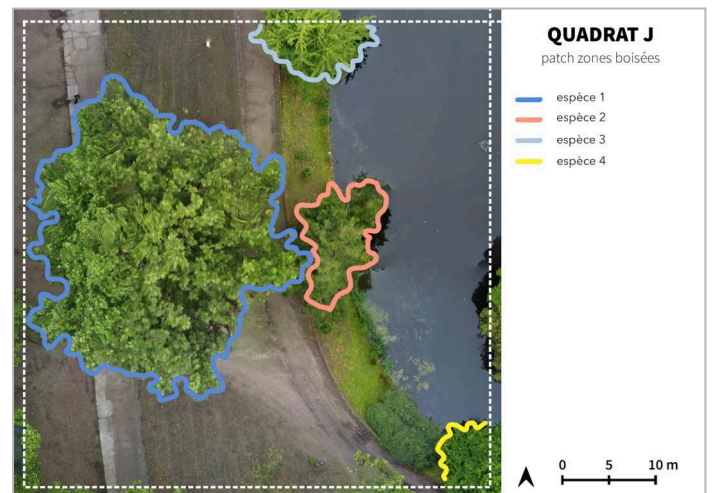


Figure 17.4. : Carte du nombre d'espèces d'arbres identifiées via des observations de l'orthomosaïque générée à partir des données drone.

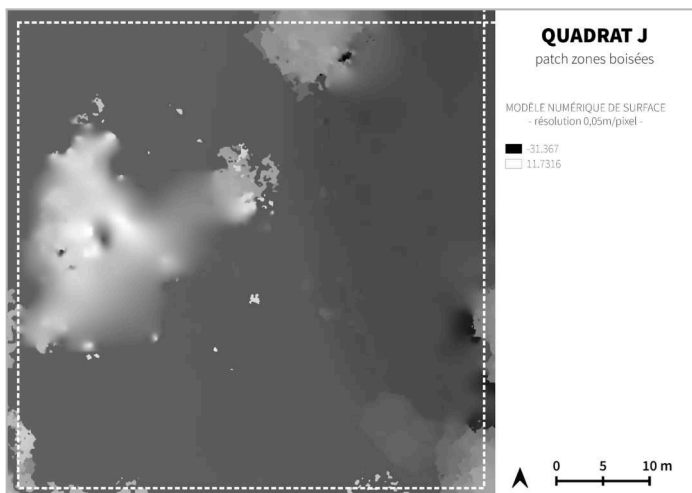


Figure 17.5. : Modèle Numérique de Surface de résolution 0,05 m/pixel

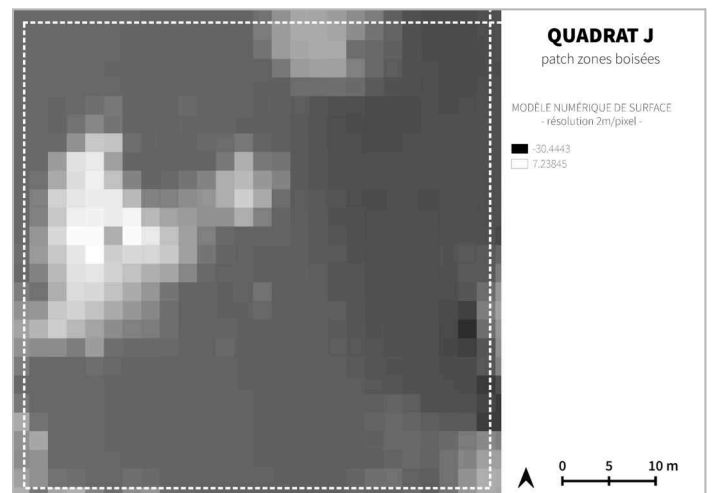


Figure 17.6. : Modèle Numérique de Surface de résolution 2 m/pixel.

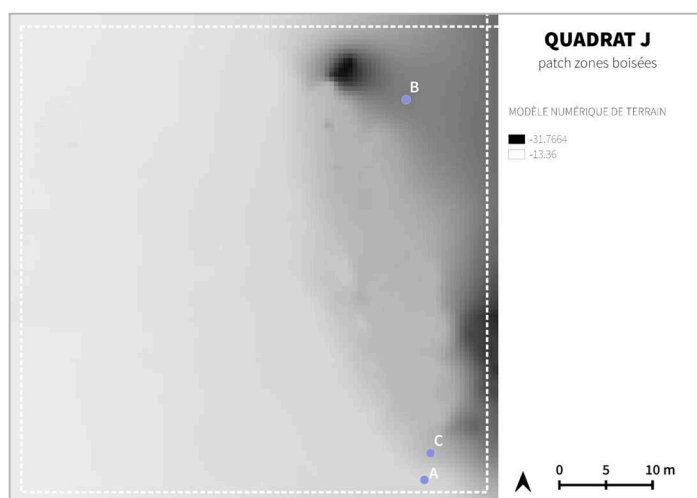


Figure 17.7. : Modèle Numérique de Terrain et localisation des 3 points aléatoirement sélectionnés pour l'indicateur de topographie.

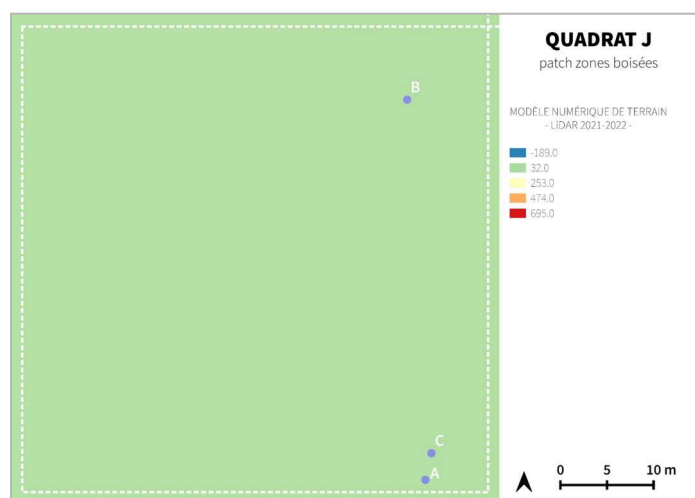


Figure 17.8. : Modèle Numérique de Terrain généré à partir des données LiDAR 2021 et localisation des 3 points aléatoirement sélectionnés pour l'indicateur de topographie.

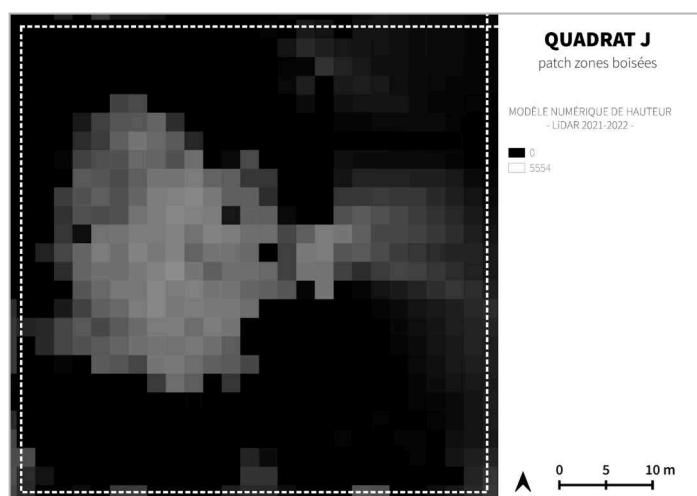


Figure 17.9. : Modèle Numérique de Hauteur, généré à partir des données LiDAR 2021.

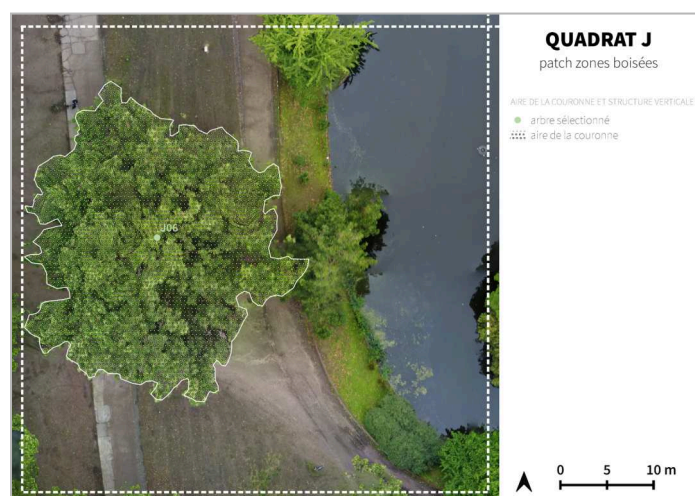


Figure 17.10. : Carte d'identification de l'arbre sélectionné pour les indicateurs d'aire de couronne et de structure verticale.

Tableau 17.1. Tableau de recensement des espèces d'arbres identifiées à partir d'un inventaire de terrain.

QUADRAT J			
ARBRES	ESPÈCES RECENSÉES	ARBRES	ESPÈCES RECENSÉES
J01	<i>Ginkgo biloba</i> L.	J05	<i>Populus x canadensis</i> Moench
J02	<i>Ginkgo biloba</i> L.	J06	<i>Platanus x hispanica</i> Mill.
J03	<i>Ginkgo biloba</i> L.	J07	<i>Corylus columna</i> L.
J04	<i>Populus x canadensis</i> Moench		

ANNEXE 18 : Ensemble des cartographies et des données générées pour le quadrat K, lors de l'étude quantitative. Production personnelle.

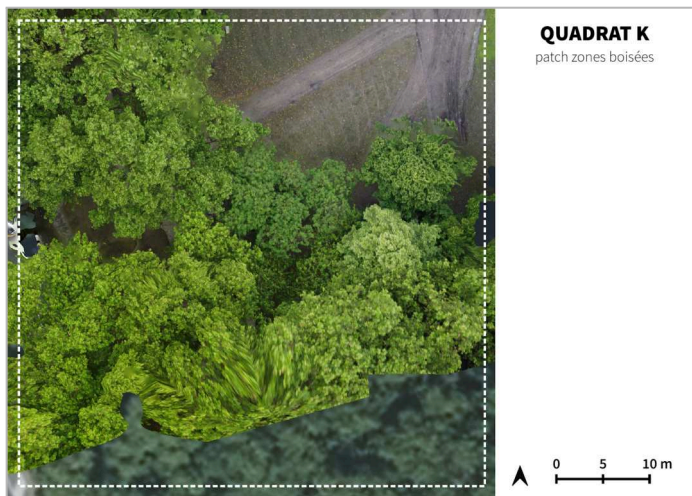


Figure 18.1. : Orthomosaïque.

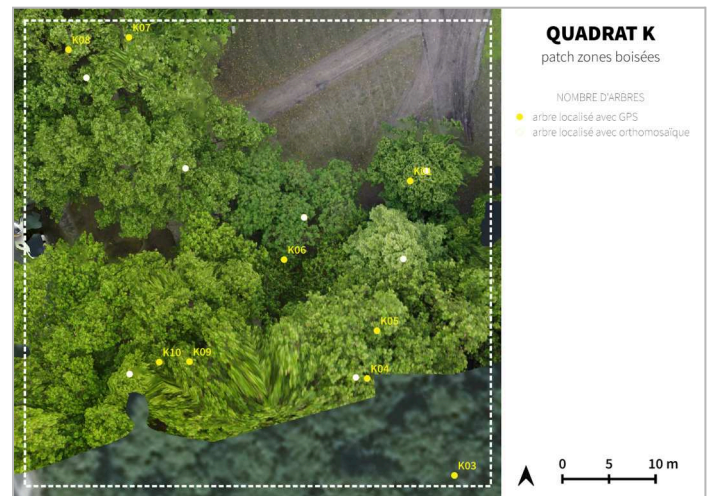


Figure 18.2. : Carte de comparaison du nombre d'arbres identifiés à l'aide de l'orthomosaïque et du MNS générés à partir des données drone et du GPS Garmin.

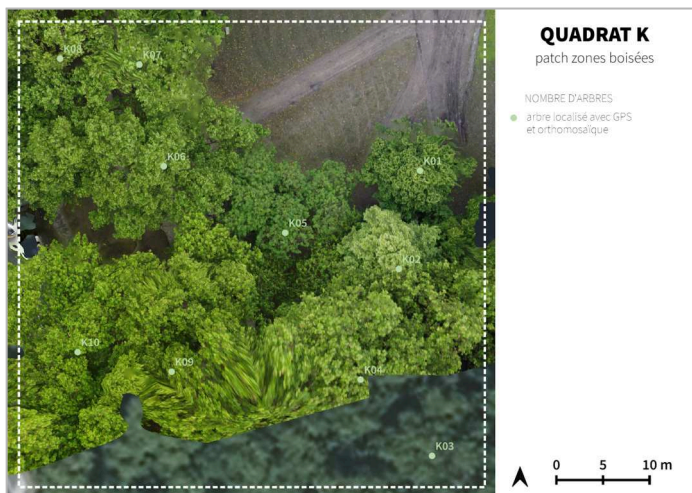


Figure 18.3. : Carte du nombre d'arbres identifiés à l'aide de l'orthomosaïque générée à partir des données drone et du GPS Garmin.

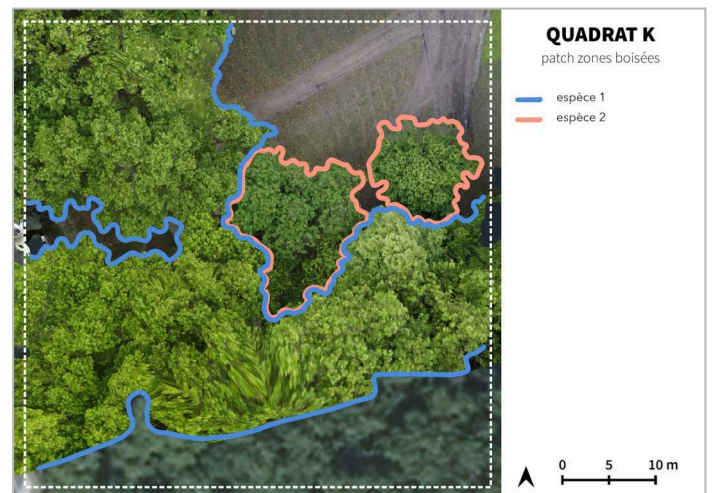


Figure 18.4. : Carte du nombre d'espèces d'arbres identifiées via des observations de l'orthomosaïque générée à partir des données drone.

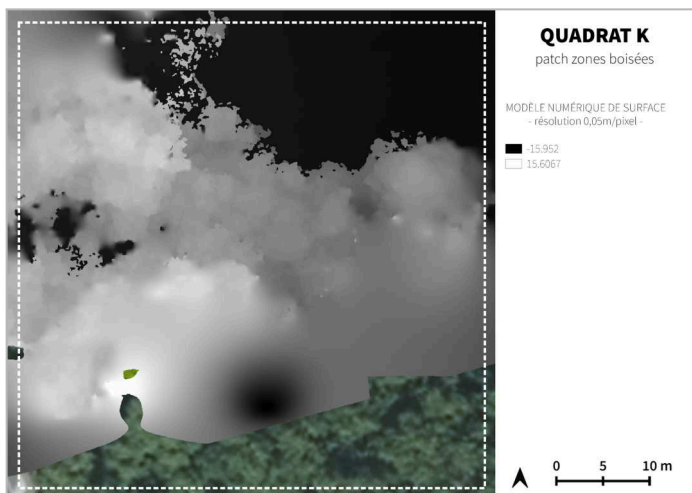


Figure 18.5. : Modèle Numérique de Surface de résolution 0,05 m/pixel

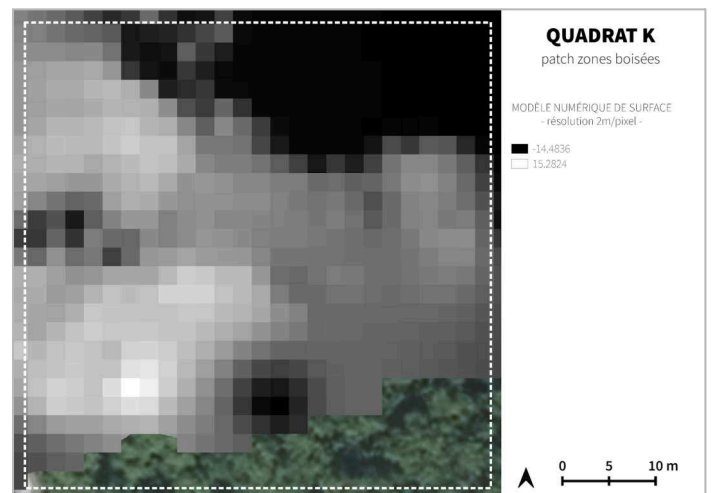


Figure 18.6. : Modèle Numérique de Surface de résolution 2 m/pixel.

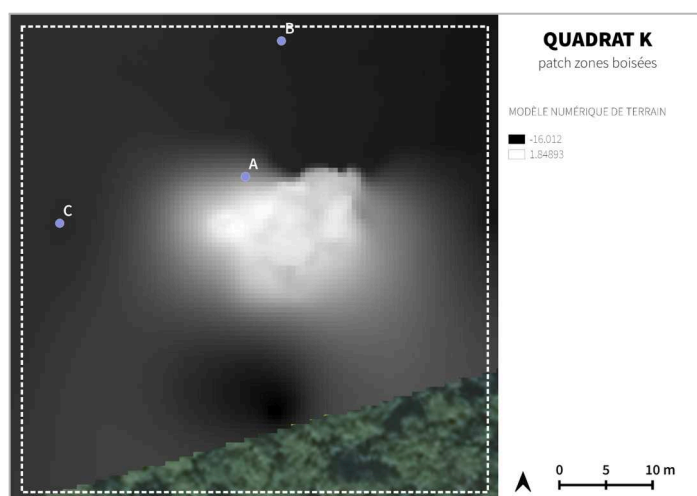


Figure 18.7. : Modèle Numérique de Terrain et localisation des 3 points aléatoirement sélectionnés pour l'indicateur de topographie.

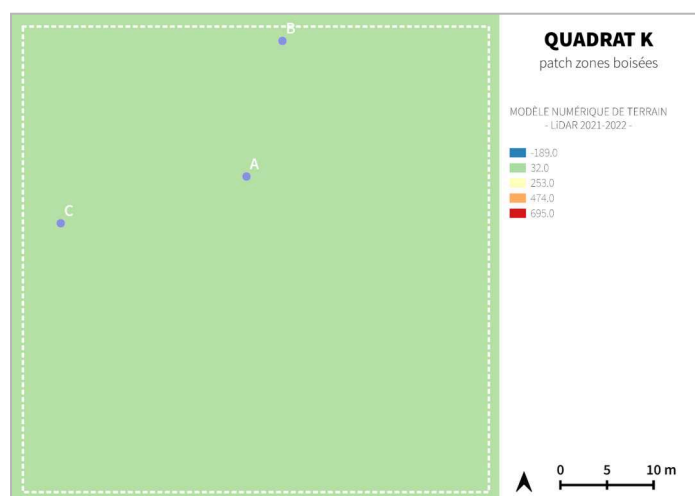


Figure 18.8. : Modèle Numérique de Terrain généré à partir des données LiDAR 2021 et localisation des 3 points aléatoirement sélectionnés pour l'indicateur de topographie.

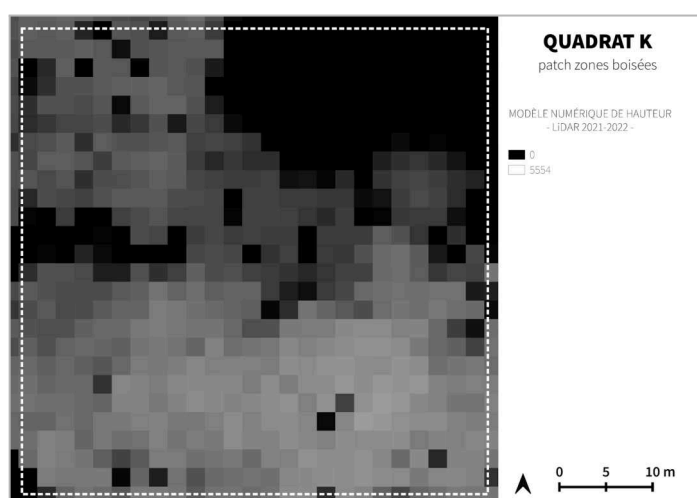


Figure 18.9. : Modèle Numérique de Hauteur, généré à partir des données LiDAR 2021.

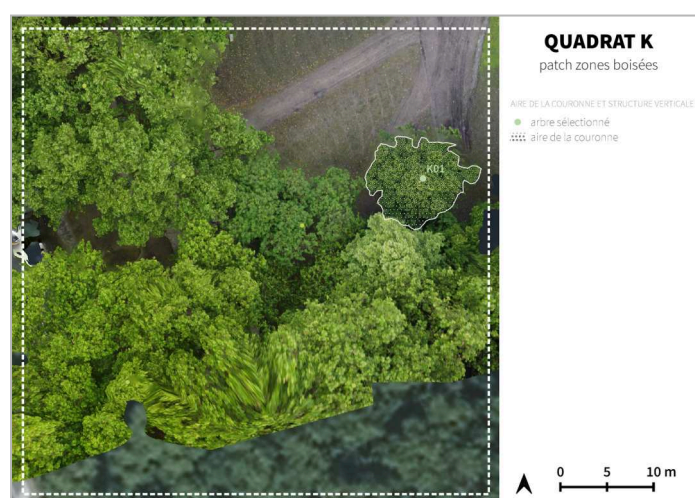


Figure 18.10. : Carte d'identification de l'arbre sélectionné pour les indicateurs d'aire de couronne et de structure verticale.

Tableau 18.1. Tableau de recensement des espèces d'arbres identifiées à partir d'un inventaire de terrain.

QUADRAT K			
ARBRES	ESPÈCES RECENSÉES	ARBRES	ESPÈCES RECENSÉES
K01	<i>Tilia x americana</i> L.	K06	<i>Fraxinus pennsylvanica</i> Marshall
K02	<i>Tilia x americana</i> L.	K07	<i>Platanus x hispanica</i> Mill.
K03	<i>Tilia x americana</i> L.	K08	<i>Platanus x hispanica</i> Mill.
K04	<i>Platanus x hispanica</i> Mill.	K09	<i>Platanus x hispanica</i> Mill.
K05	<i>Tilia x europaea</i> L.	K10	<i>Platanus x hispanica</i> Mill.

ANNEXE 19 : Ensemble des cartographies et des données générées pour le quadrat L, lors de l'étude quantitative. Production personnelle.



Figure 19.1. : Orthomosaïque.



Figure 19.2. : Carte de comparaison du nombre d'arbres identifiés à l'aide de l'orthomosaïque et du MNS générés à partir des données drone et du GPS Garmin.



Figure 19.3. : Carte du nombre d'arbres identifiés à l'aide de l'orthomosaïque générée à partir des données drone et du GPS Garmin.

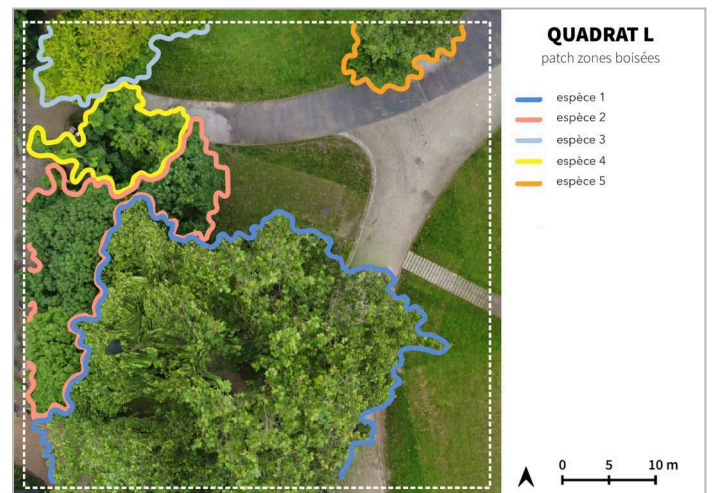


Figure 19.4. : Carte du nombre d'espèces d'arbres identifiées via des observations de l'orthomosaïque générée à partir des données drone.

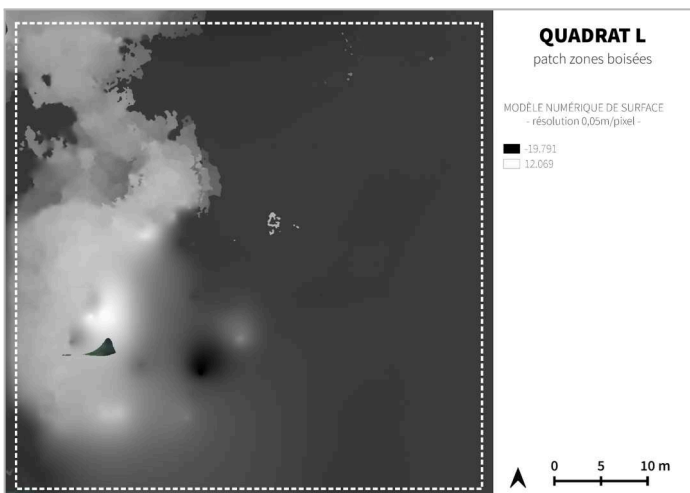


Figure 19.5. : Modèle Numérique de Surface de résolution 0,05 m/pixel

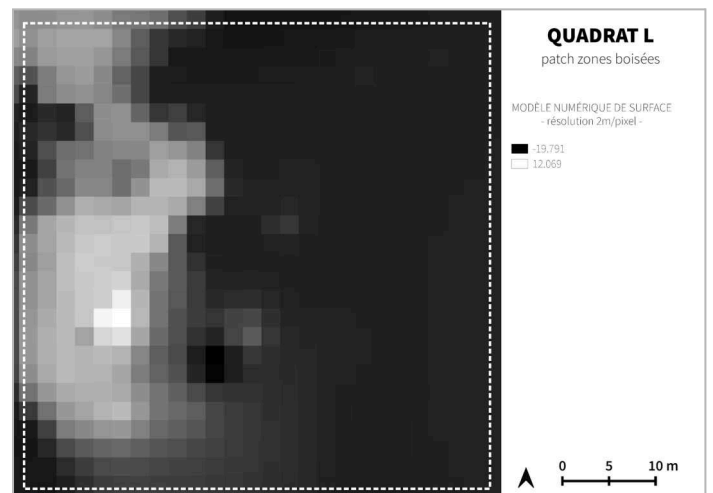


Figure 19.6. : Modèle Numérique de Surface de résolution 2 m/pixel.

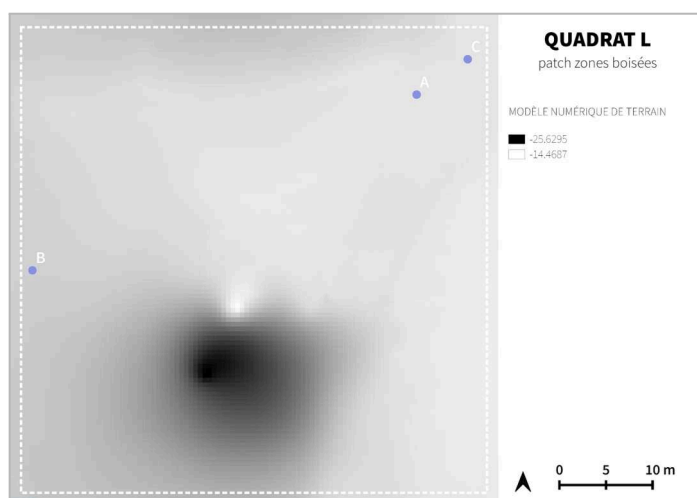


Figure 19.7. : Modèle Numérique de Terrain et localisation des 3 points aléatoirement sélectionnés pour l'indicateur de topographie.

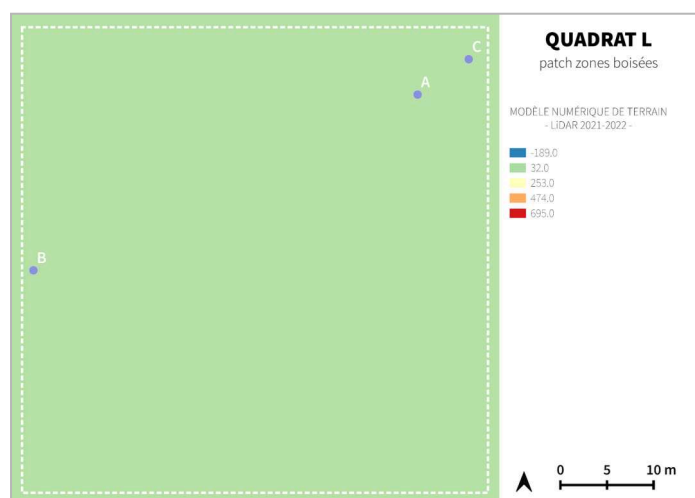


Figure 19.8. : Modèle Numérique de Terrain généré à partir des données LiDAR 2021 et localisation des 3 points aléatoirement sélectionnés pour l'indicateur de topographie.

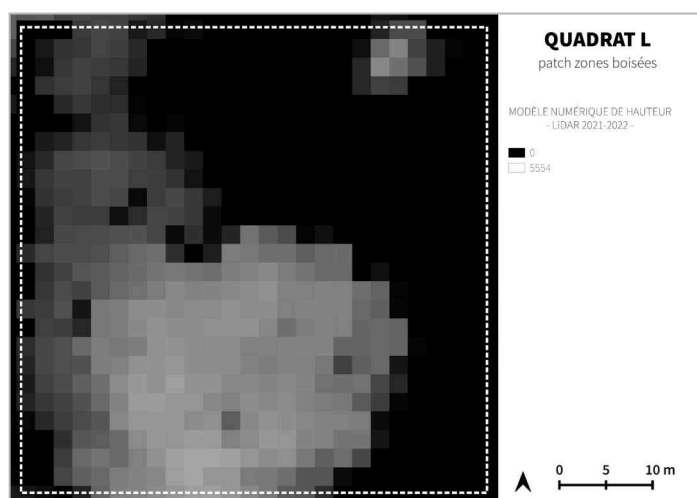


Figure 19.9. : Modèle Numérique de Hauteur, généré à partir des données LiDAR 2021.



Figure 19.10. : Carte d'identification de l'arbre sélectionné pour les indicateurs d'aire de couronne et de structure verticale.

Tableau 19.1. Tableau de recensement des espèces d'arbres identifiées à partir d'un inventaire de terrain.

QUADRAT L			
ARBRES	ESPÈCES RECENSÉES	ARBRES	ESPÈCES RECENSÉES
L01	<i>Populus x canadensis</i> Moench	L06	<i>Aesculus hippocastanum</i> L.
L02	<i>Gleditsia triacanthos</i> L.	L07	<i>Platanus x hispanica</i> Mill.
L03	<i>Aesculus hippocastanum</i> L.	L08	<i>Platanus x hispanica</i> Mill.
L04	<i>Acer saccharum</i> Marshall	L09	<i>Platanus x hispanica</i> Mill.
L05	<i>Aesculus hippocastanum</i> L.	L10	<i>Platanus x hispanica</i> Mill.

ANNEXE 20 : Ensemble des cartographies et des données générées pour le quadrat M, lors de l'étude quantitative. Production personnelle.

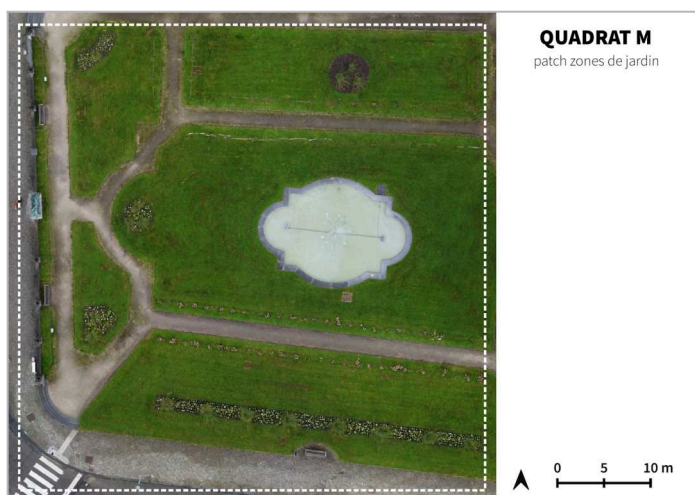


Figure 20.1 : Orthomosaïque.

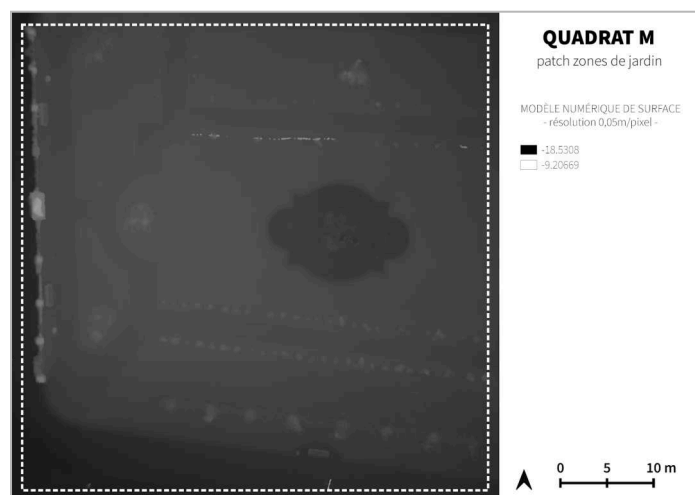


Figure 20.5 : Modèle Numérique de Surface de résolution 0,05 m/pixel

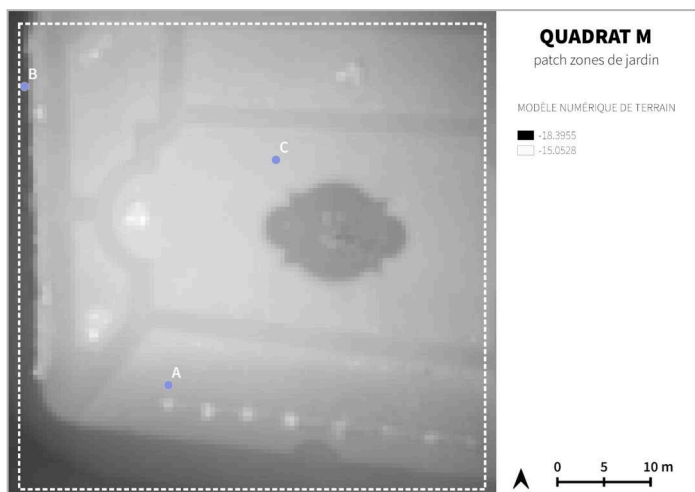


Figure 20.7 : Modèle Numérique de Terrain et localisation des 3 points aléatoirement sélectionnés pour l'indicateur de topographie.

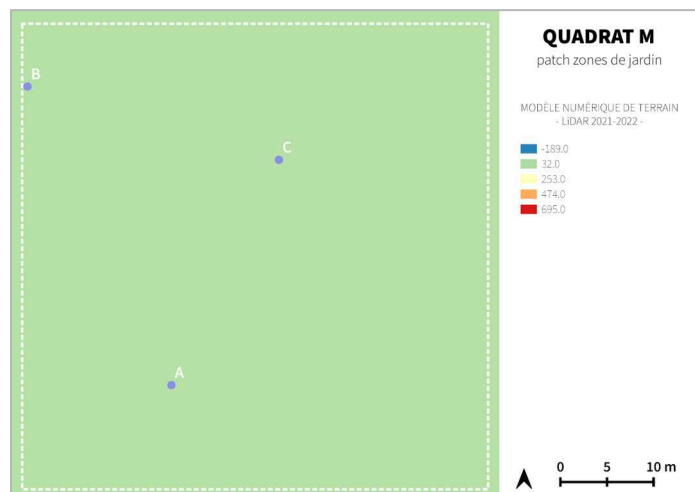


Figure 20.8 : Modèle Numérique de Terrain généré à partir des données LiDAR 2021 et localisation des 3 points aléatoirement sélectionnés pour l'indicateur de topographie.

ANNEXE 21 : Ensemble des cartographies et des données générées pour le quadrat N, lors de l'étude quantitative. Production personnelle.

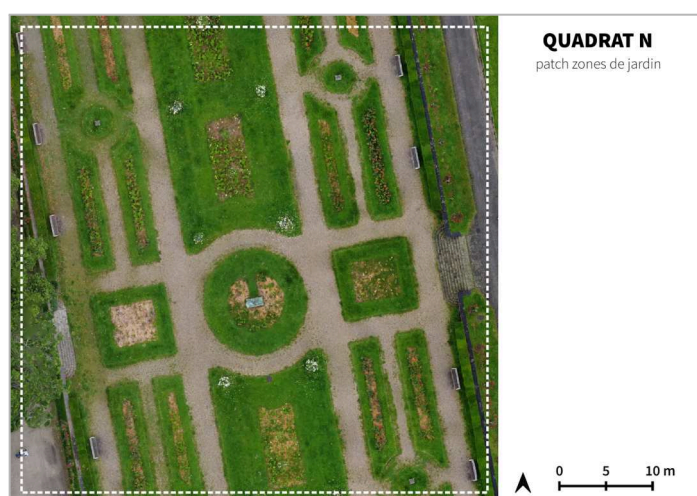


Figure 21.1. : Orthomosaïque.

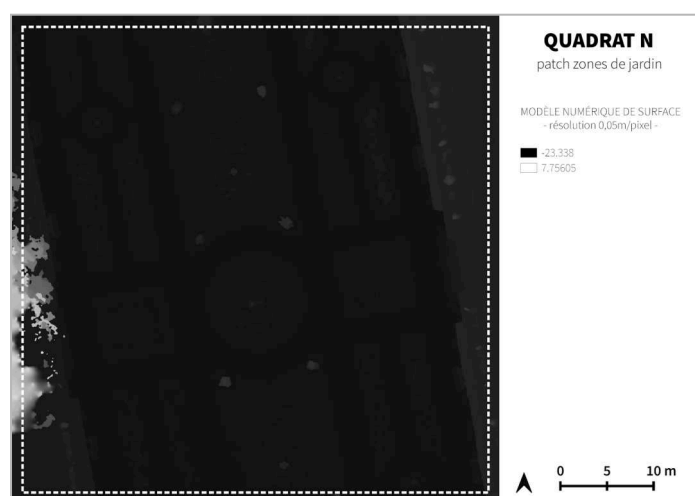


Figure 21.5. : Modèle Numérique de Surface de résolution 0,05 m/pixel

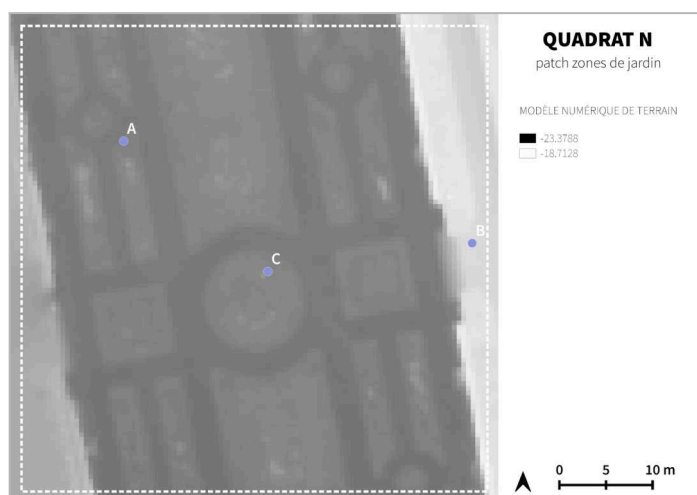


Figure 21.7. : Modèle Numérique de Terrain et localisation des 3 points aléatoirement sélectionnés pour l'indicateur de topographie.

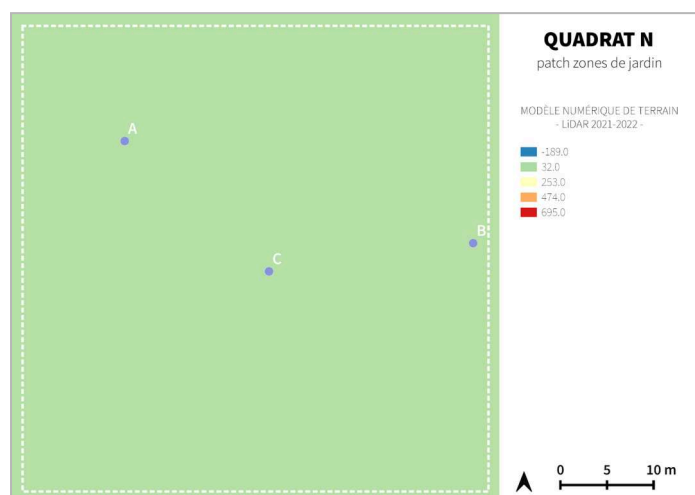


Figure 21.8. : Modèle Numérique de Terrain généré à partir des données LiDAR 2021 et localisation des 3 points aléatoirement sélectionnés pour l'indicateur de topographie.

ANNEXE 22 : Ensemble des cartographies et des données générées pour le quadrat O, lors de l'étude quantitative. Production personnelle.



Figure 22.1. : Orthomosaïque.



Figure 22.2. : Carte de comparaison du nombre d'arbres identifiés à l'aide de l'orthomosaïque et du MNS générés à partir des données drone et du GPS Garmin.



Figure 22.3. : Carte du nombre d'arbres identifiés à l'aide de l'orthomosaïque générée à partir des données drone et du GPS Garmin.

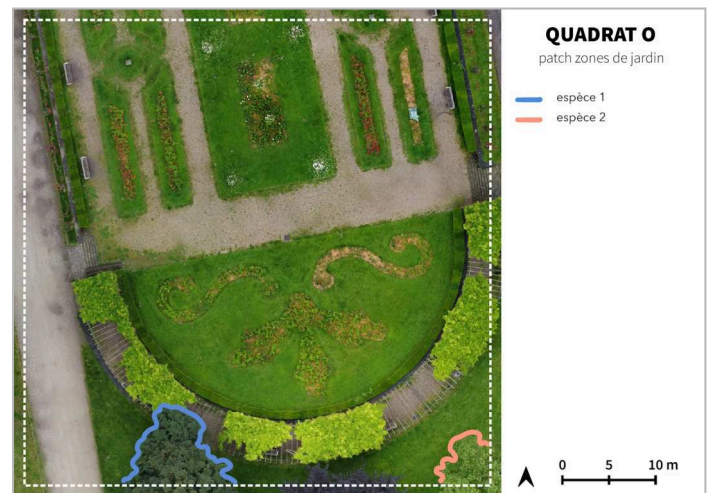


Figure 22.4. : Carte du nombre d'espèces d'arbres identifiées via des observations de l'orthomosaïque générée à partir des données drone.



Figure 22.5. : Modèle Numérique de Surface de résolution 0,05 m/pixel

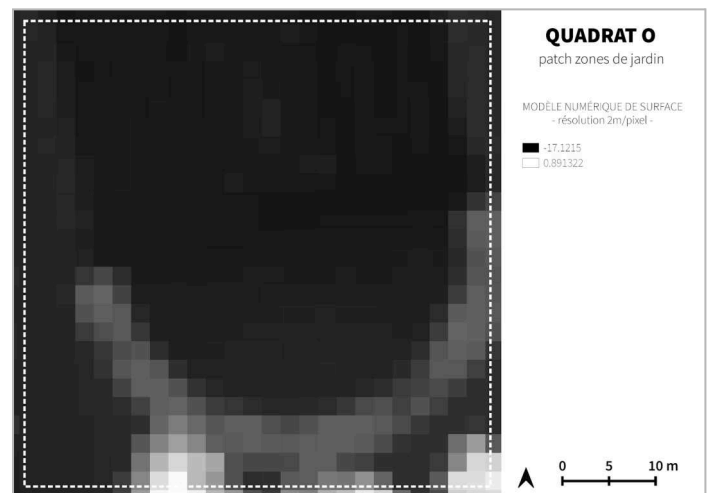


Figure 22.6. : Modèle Numérique de Surface de résolution 2 m/pixel.



Figure 22.7. : Modèle Numérique de Terrain et localisation des 3 points aléatoirement sélectionnés pour l'indicateur de topographie.

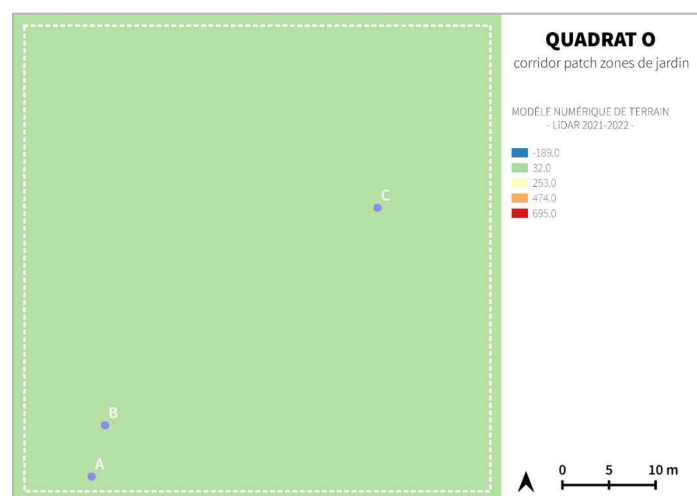


Figure 22.8. : Modèle Numérique de Terrain généré à partir des données LiDAR 2021 et localisation des 3 points aléatoirement sélectionnés pour l'indicateur de topographie.

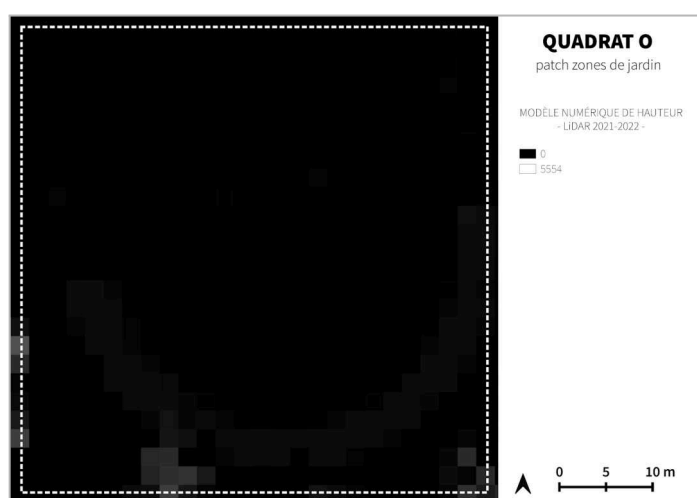


Figure 22.9. : Modèle Numérique de Hauteur, généré à partir des données LiDAR 2021.



Figure 22.10. : Carte d'identification de l'arbre sélectionné pour les indicateurs d'aire de couronne et de structure verticale.

Tableau 22.1. Tableau de recensement des espèces d'arbres identifiées à partir d'un inventaire de terrain.

QUADRAT O			
ARBRES	ESPÈCES RECENSÉES	ARBRES	ESPÈCES RECENSÉES
O01	<i>Acer pseudoplatanus</i> L.	O02	<i>Catalpa ovata</i> G. Don.

ANNEXE 23 : Ensemble des cartographies et des données générées pour le quadrat P, lors de l'étude quantitative. (Production personnelle)



Figure 23.1 : Orthomosaïque.

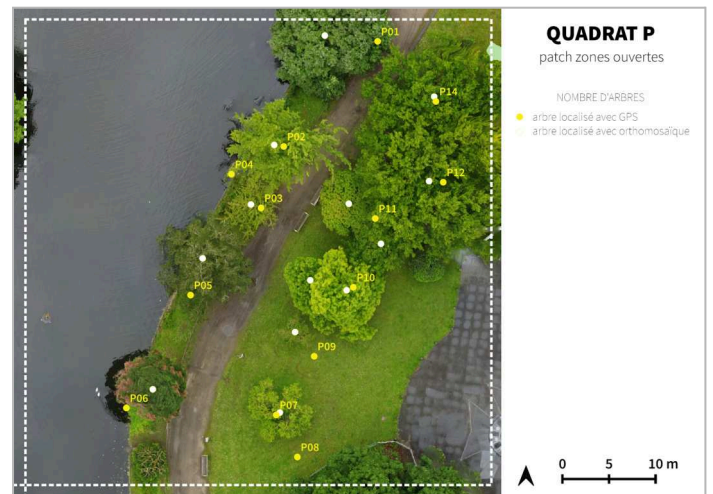


Figure 23.2 : Carte de comparaison du nombre d'arbres identifiés à l'aide de l'orthomosaïque et du MNS générés à partir des données drone et du GPS Garmin.



Figure 23.3 : Carte du nombre d'arbres identifiés à l'aide de l'orthomosaïque générée à partir des données drone et du GPS Garmin.

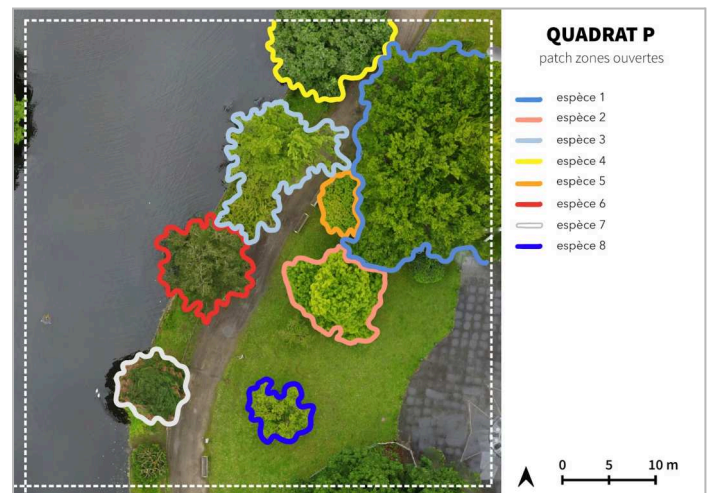


Figure 23.4 : Carte du nombre d'espèces d'arbres identifiées via des observations de l'orthomosaïque générée à partir des données drone.

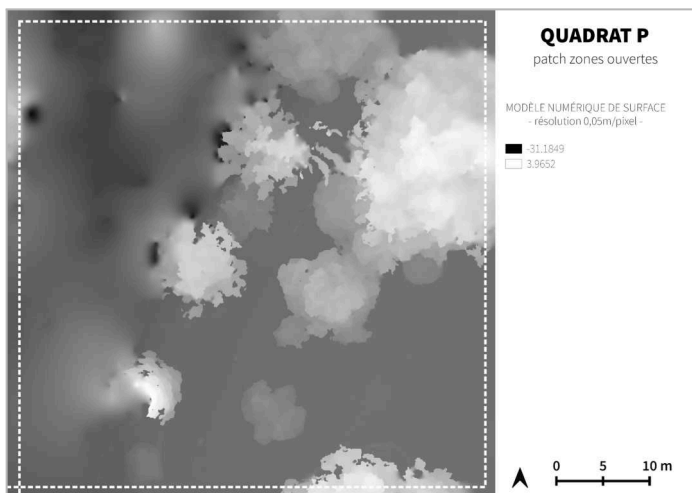


Figure 23.5 : Modèle Numérique de Surface de résolution 0,05 m/pixel

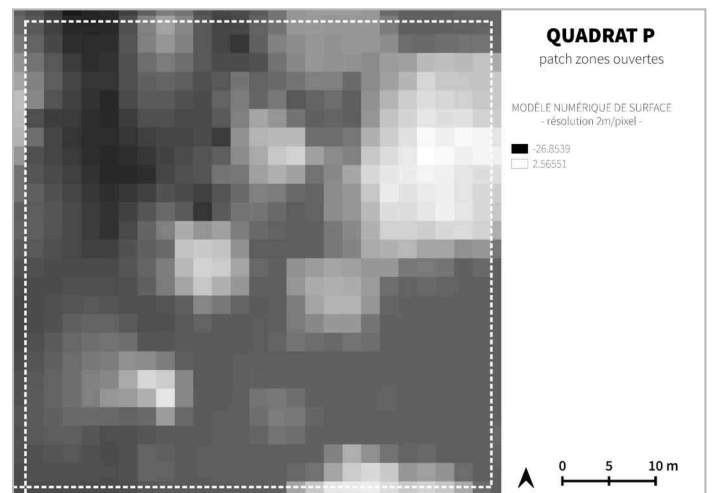


Figure 23.6 : Modèle Numérique de Surface de résolution 2 m/pixel.

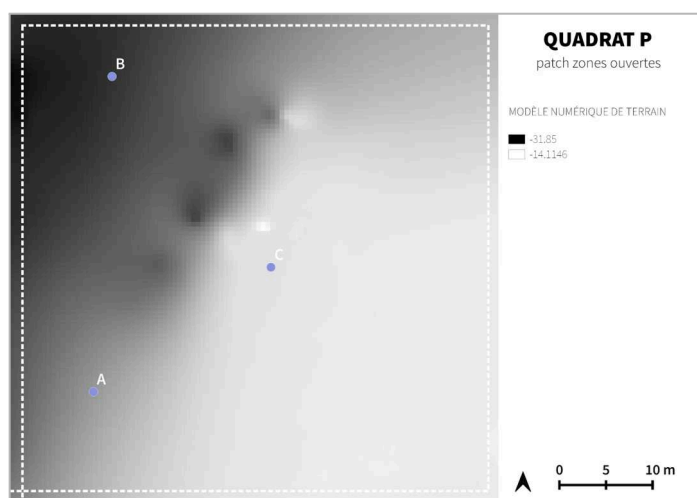


Figure 23.7. : Modèle Numérique de Terrain et localisation des 3 points aléatoirement sélectionnés pour l'indicateur de topographie.

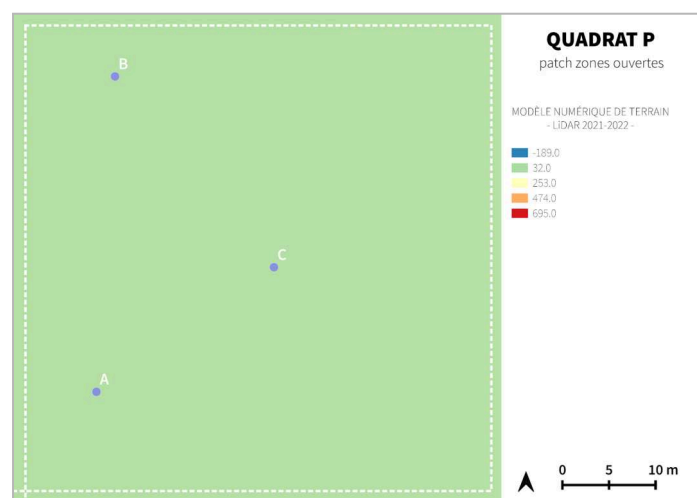


Figure 23.8. : Modèle Numérique de Terrain généré à partir des données LiDAR 2021 et localisation des 3 points aléatoirement sélectionnés pour l'indicateur de topographie.

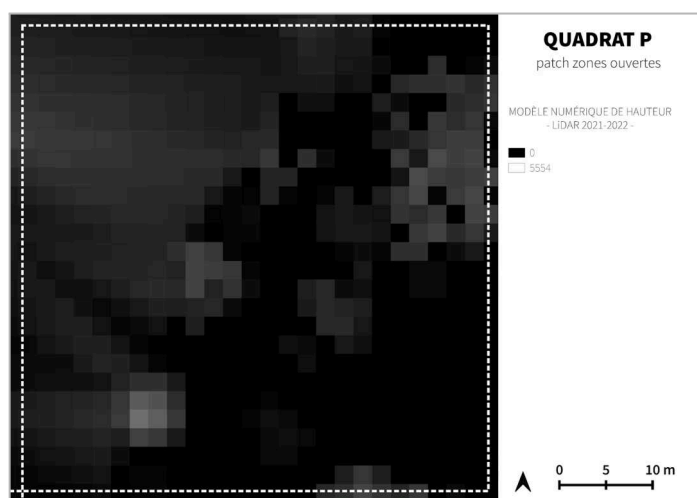


Figure 23.9. : Modèle Numérique de Hauteur, généré à partir des données LiDAR 2021.

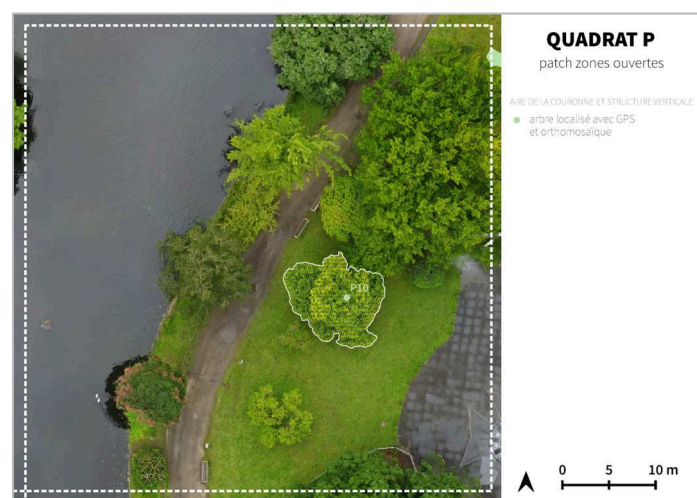


Figure 23.10. : Carte d'identification de l'arbre sélectionné pour les indicateurs d'aire de couronne et de structure verticale.

Tableau 23.1. Tableau de recensement des espèces d'arbres identifiées à partir d'un inventaire de terrain.

QUADRAT P			
ARBRES	ESPÈCES RECENSÉES	ARBRES	ESPÈCES RECENSÉES
P01	<i>Aria edulis</i> (Willd.) M. Roem.	P08	<i>Citrus trifoliata</i> L.
P02	<i>Ginkgo biloba</i> L.	P09	<i>Prunus cerasus</i> L.
P03	<i>Ginkgo biloba</i> L.	P10	<i>Castanea sativa</i> Mill.
P04	<i>Ginkgo biloba</i> L.	P11	<i>Acer saccharum</i> Marshall
P05	<i>Betula pubescens</i> Ehrh	P12	<i>Quercus robur</i> L.
P06	<i>Sequoiadendron giganteum</i>	P13	<i>Quercus robur</i> L.
P07	<i>Citrus trifoliata</i> L.		

ANNEXE 24 : Ensemble des cartographies et des données générées pour le quadrat Q, lors de l'étude quantitative. Production personnelle.

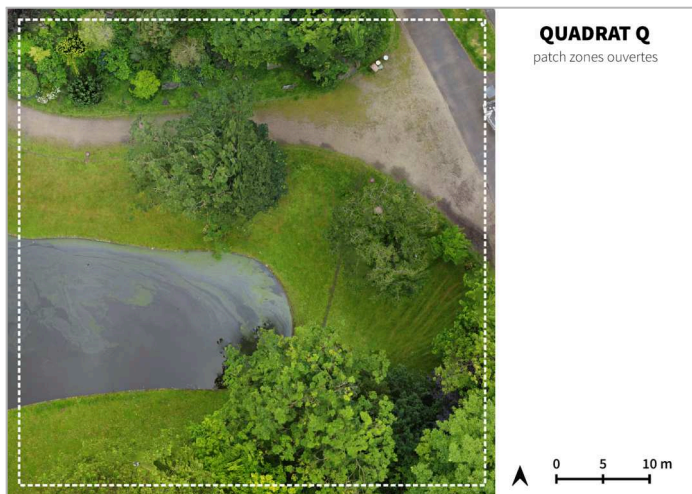


Figure 24.1. : Orthomosaïque.

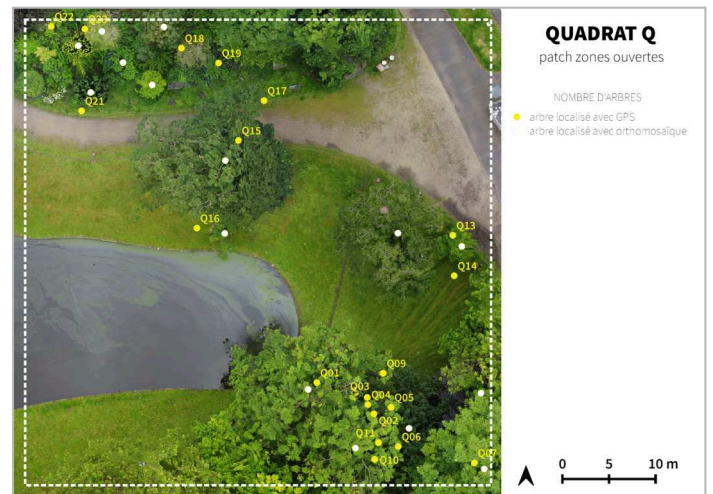


Figure 24.2. : Carte de comparaison du nombre d'arbres identifiés à l'aide de l'orthomosaïque et du MNS générés à partir des données drone et du GPS Garmin.

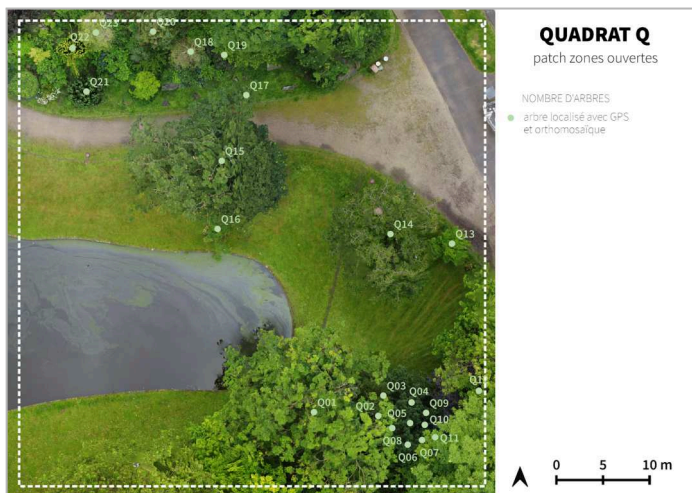


Figure 24.3. : Carte du nombre d'arbres identifiés à l'aide de l'orthomosaïque générée à partir des données drone et du GPS Garmin.

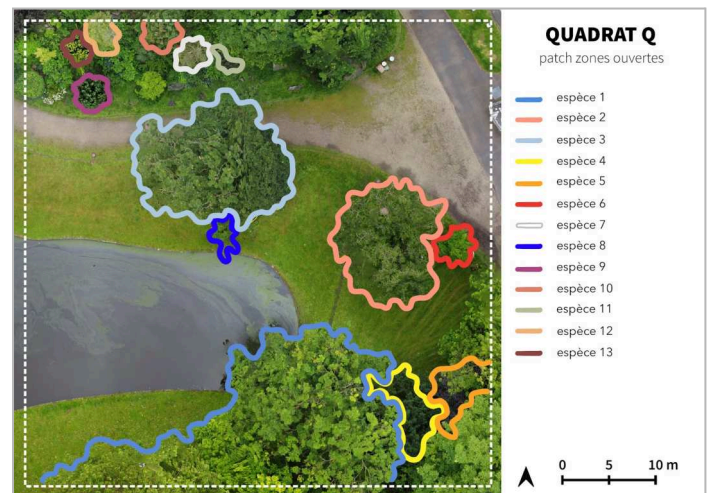


Figure 24.4. : Carte du nombre d'espèces d'arbres identifiées via des observations de l'orthomosaïque générée à partir des données drone.

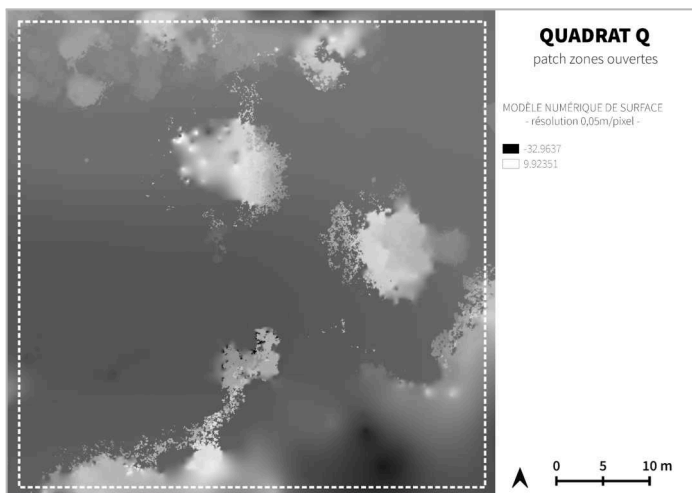


Figure 24.5. : Modèle Numérique de Surface de résolution 0,05 m/pixel

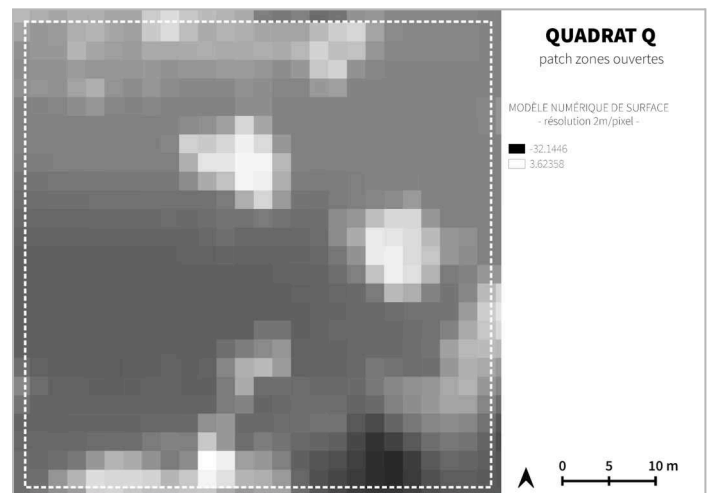


Figure 24.6. : Modèle Numérique de Surface de résolution 2 m/pixel.

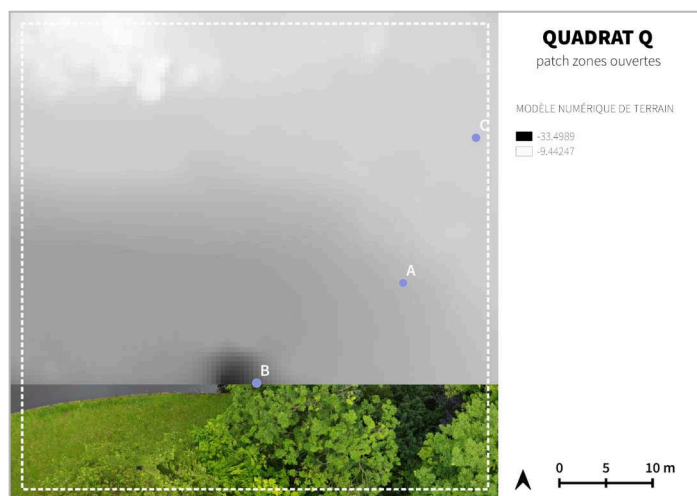


Figure 24.7. : Modèle Numérique de Terrain et localisation des 3 points aléatoirement sélectionnés pour l'indicateur de topographie.

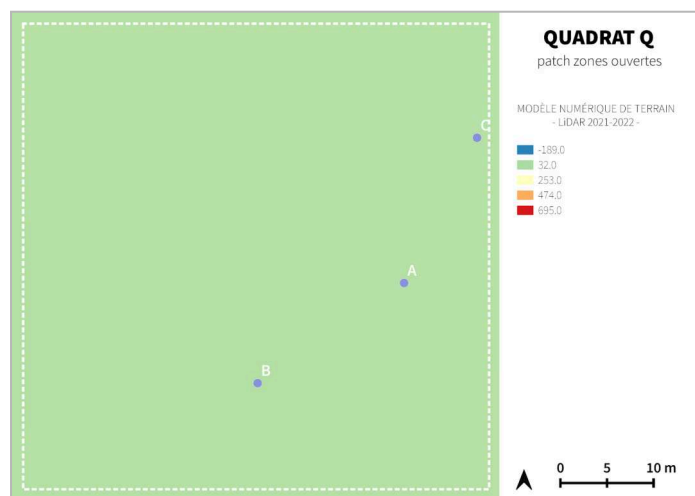


Figure 24.8. : Modèle Numérique de Terrain généré à partir des données LiDAR 2021 et localisation des 3 points aléatoirement sélectionnés pour l'indicateur de topographie.

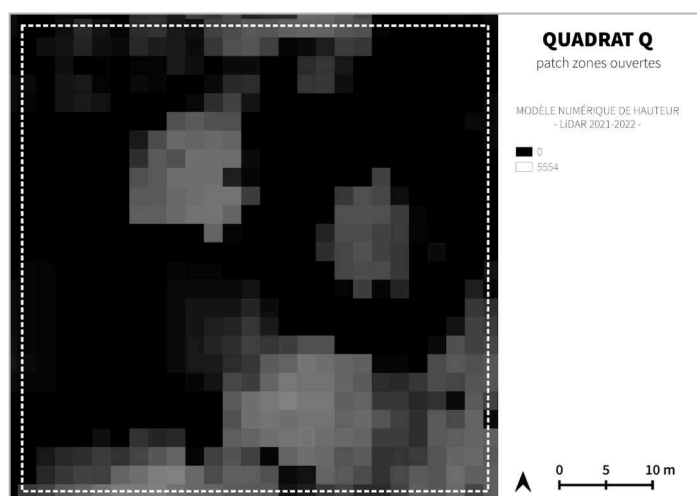


Figure 24.9. : Modèle Numérique de Hauteur, généré à partir des données LiDAR 2021.

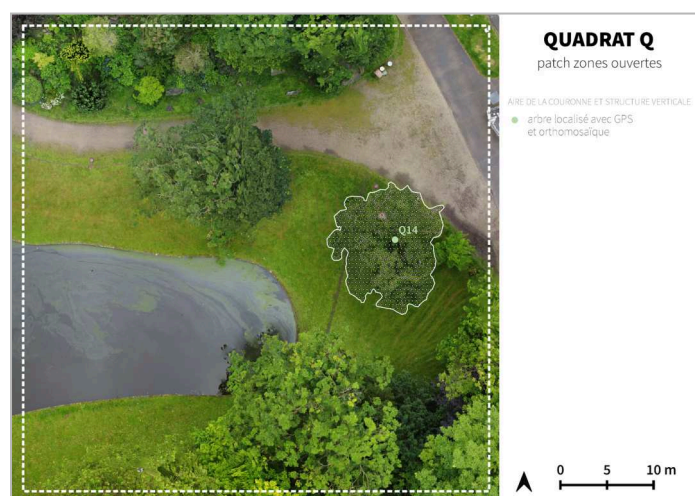


Figure 24.10. : Carte d'identification de l'arbre sélectionné pour les indicateurs d'aire de couronne et de structure verticale.

Tableau 24.1. Tableau de recensement des espèces d'arbres identifiées à partir d'un inventaire de terrain.

QUADRAT Q			
ARBRES	ESPÈCES RECENSÉES	ARBRES	ESPÈCES RECENSÉES
Q01	<i>Acer pseudoplatanus</i>	Q12	<i>Fagus orientalis</i> Lipsky
Q02	<i>Taxus brevifolia</i>	Q13	<i>Quercus petraea</i> (Matt.) Liebl.
Q03	<i>Taxus brevifolia</i>	Q14	<i>Prunus x yedoensis</i> Matsum
Q04	<i>Taxus brevifolia</i>	Q15	<i>Acer pseudoplatanus</i>
Q05	<i>Taxus brevifolia</i>	Q16	<i>Robinia pseudoacacia</i>
Q06	<i>Taxus brevifolia</i>	Q17	<i>Taxus cuspidata</i> Sieb. et Zucc.
Q07	<i>Taxus brevifolia</i>	Q18	<i>Chamaecyparis obtusa</i>
Q08	<i>Taxus brevifolia</i>	Q19	<i>Corylus maxima</i> Mill.
Q09	<i>Taxus brevifolia</i>	Q20	<i>Cryptomeria japonica</i> (Thunb. ex L.f.)
Q10	<i>Taxus brevifolia</i>	Q21 + Q22	<i>Taxus cuspidata</i> Sieb. et Zucc.
Q11	<i>Taxus brevifolia</i>	Q23	<i>Chamaecyparis obtusa</i>

ANNEXE 25 : Ensemble des cartographies et des données générées pour le quadrat R, lors de l'étude quantitative. Production personnelle.



Figure 25.1. : Orthomosaïque.



Figure 25.2. : Carte de comparaison du nombre d'arbres identifiés à l'aide de l'orthomosaïque et du MNS générés à partir des données drone et du GPS Garmin.



Figure 25.3. : Carte du nombre d'arbres identifiés à l'aide de l'orthomosaïque générée à partir des données drone et du GPS Garmin.

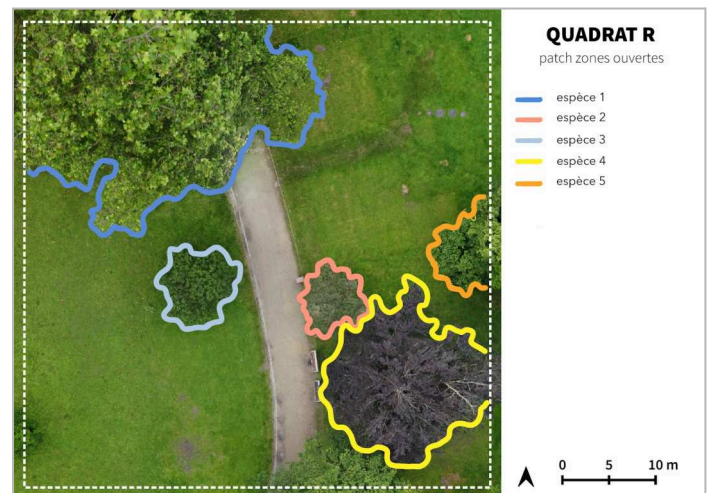


Figure 25.4. : Carte du nombre d'espèces d'arbres identifiées via des observations de l'orthomosaïque générée à partir des données drone.

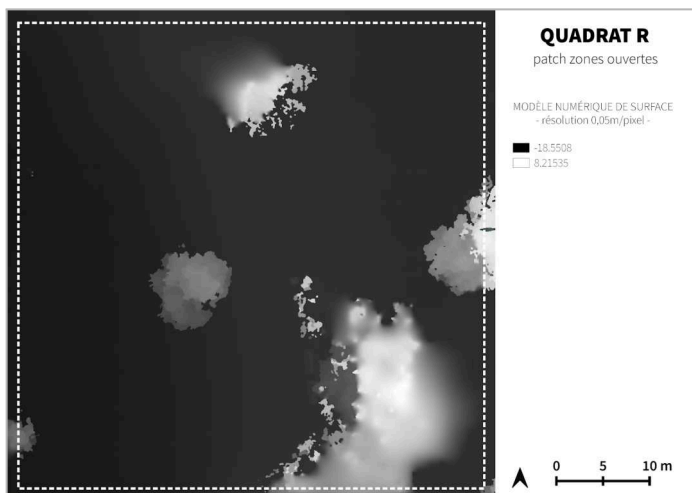


Figure 25.5. : Modèle Numérique de Surface de résolution 0,05 m/pixel

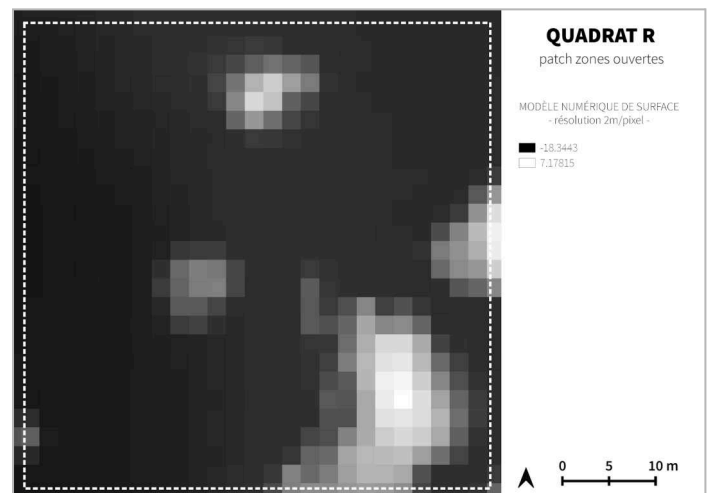


Figure 25.6. : Modèle Numérique de Surface de résolution 2 m/pixel.

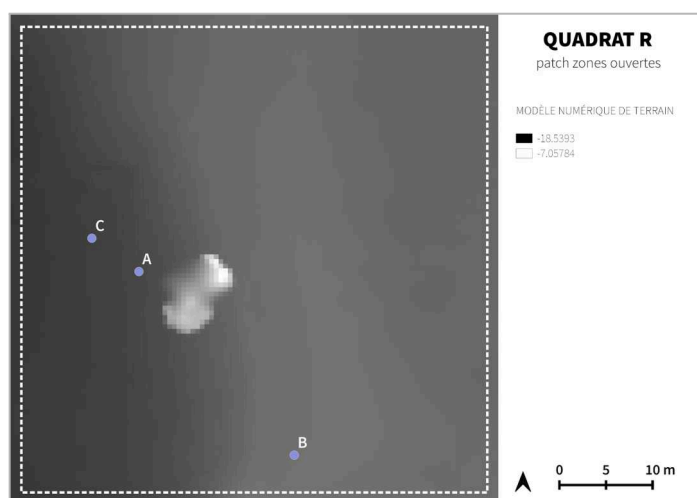


Figure 25.7. : Modèle Numérique de Terrain et localisation des 3 points aléatoirement sélectionnés pour l'indicateur de topographie.

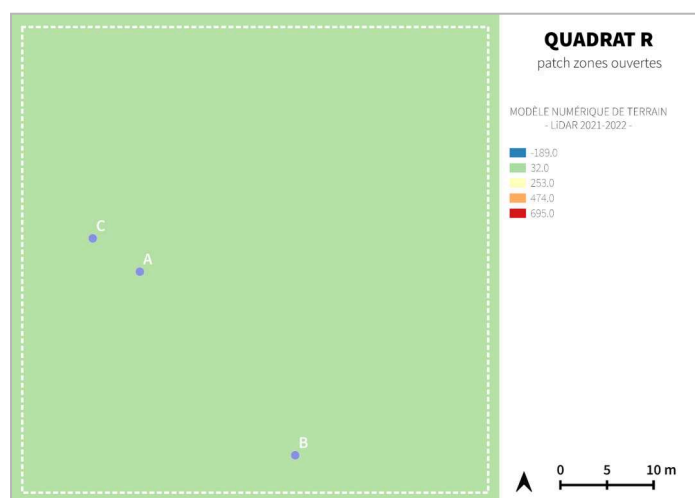


Figure 25.8. : Modèle Numérique de Terrain généré à partir des données LiDAR 2021 et localisation des 3 points aléatoirement sélectionnés pour l'indicateur de topographie.

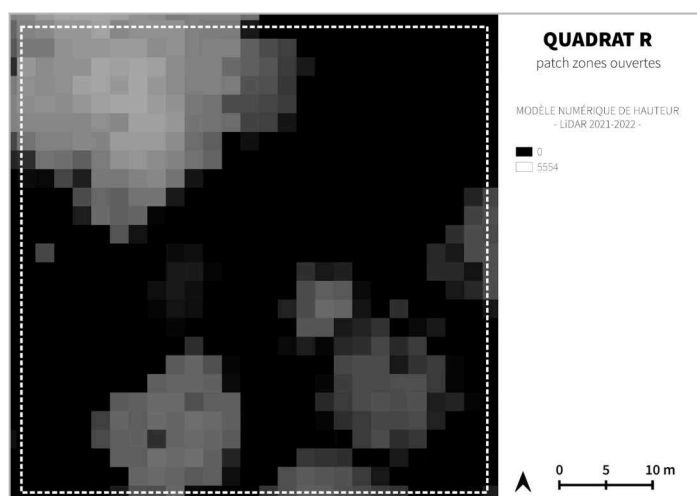


Figure 25.9. : Modèle Numérique de Hauteur, généré à partir des données LiDAR 2021.

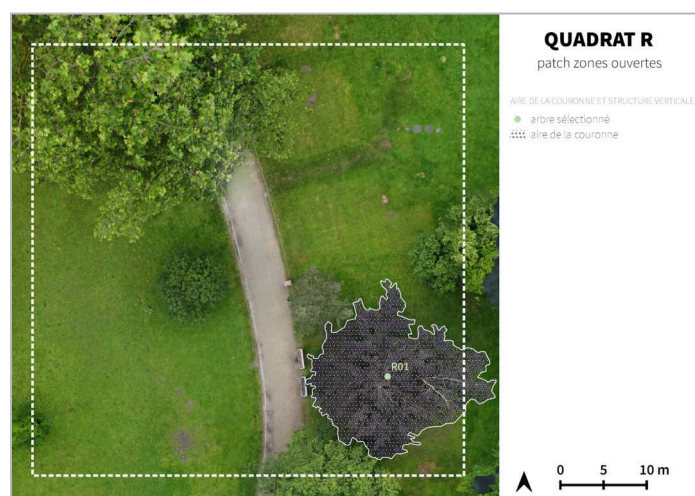


Figure 25.10. : Carte d'identification de l'arbre sélectionné pour les indicateurs d'aire de couronne et de structure verticale.

Tableau 25.1. Tableau de recensement des espèces d'arbres identifiées à partir d'un inventaire de terrain.

QUADRAT R			
ARBRES	ESPÈCES RECENSÉES	ARBRES	ESPÈCES RECENSÉES
R01	<i>Fagus sylvatica</i>	R04	<i>Aesculus x carnea</i> Zeyh.
R02	<i>Pinus resinosa</i> Aiton	R05	<i>Platanus x hispanica</i> Mill.
R03	<i>Tilia cordata</i> Mill.		

ANNEXE 26 : Ensemble des résultats générés pour l'indicateur du nombre d'arbres dans le cadre de l'étude quantitative . Production personnelle.

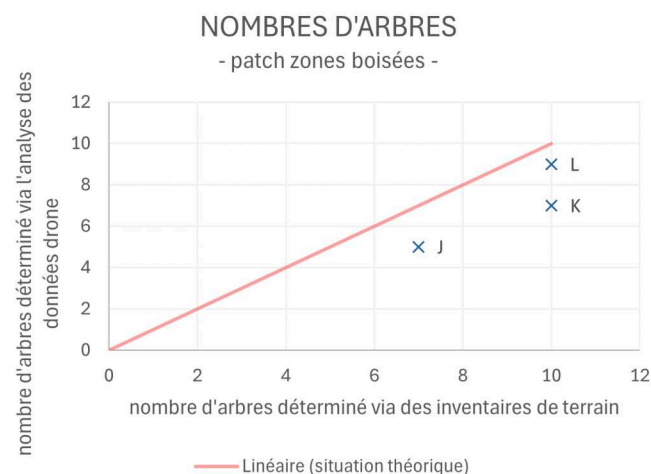
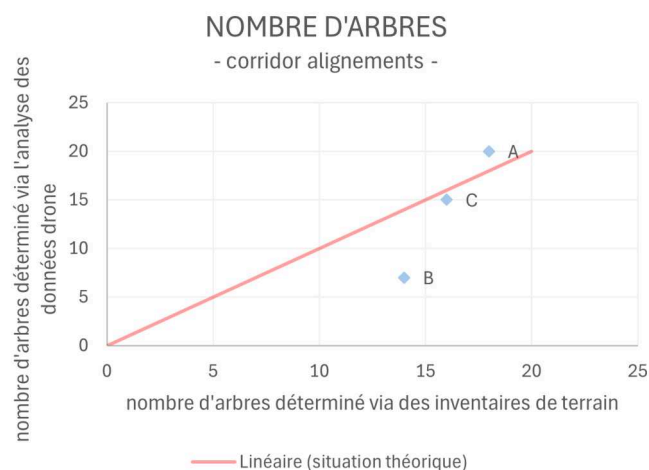


Figure 26.1 : Diagramme de dispersion du nombre d'arbres présents dans les quadrats A, B et C de la typologie "alignements", obtenu à partir d'inventaires de terrain (axe des x) et d'observations des orthomosaïques et des MNS générés à partir des images capturées par le drone (axe des y). Ce diagramme inclut une courbe de tendance illustrant une relation de proportionnalité parfaite entre les deux variables (situation théorique). (Production personnelle)

Figure 26.2 : Diagramme de dispersion du nombre d'arbres présents dans les quadrats J, K et L de la typologie "zones boisées", obtenu à partir d'inventaires de terrain (axe des x) et d'observations des orthomosaïques et des MNS générés à partir des images capturées par le drone (axe des y). Ce diagramme inclut une courbe de tendance illustrant une relation de proportionnalité parfaite entre les deux variables (situation théorique). (Production personnelle)

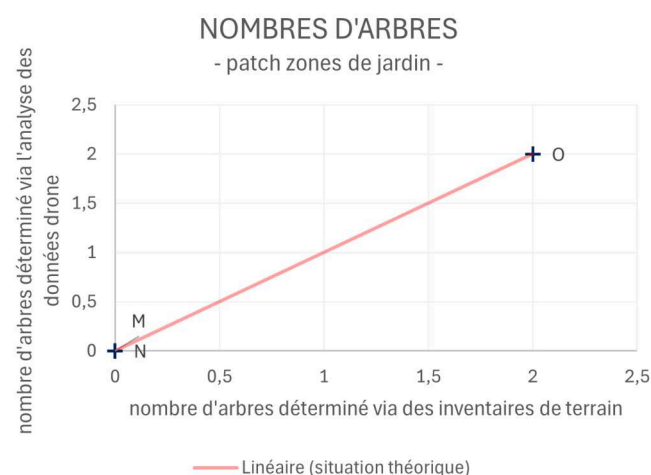
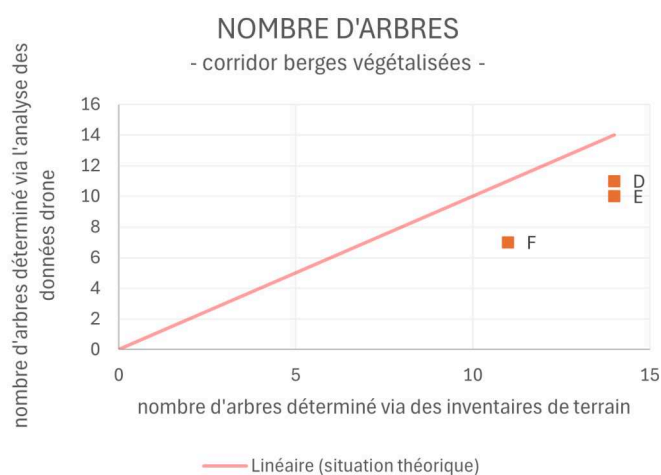


Figure 26.3 : Diagramme de dispersion du nombre d'arbres présents dans les quadrats D, E et F de la typologie "berges végétalisées", obtenu à partir d'inventaires de terrain (axe des x) et d'observations des orthomosaïques et des MNS générés à partir des images capturées par le drone (axe des y). Ce diagramme inclut une courbe de tendance illustrant une relation de proportionnalité parfaite entre les deux variables (situation théorique). (Production personnelle)

Figure 26.4 : Diagramme de dispersion du nombre d'arbres présents dans les quadrats M, N et O de la typologie "zones de jardin", obtenu à partir d'inventaires de terrain (axe des x) et d'observations des orthomosaïques et des MNS générés à partir des images capturées par le drone (axe des y). Ce diagramme inclut une courbe de tendance illustrant une relation de proportionnalité parfaite entre les deux variables (situation théorique). (Production personnelle)



Figure 26.5. : Diagramme de dispersion du nombre d'arbres présents dans les quadrats G, H et I de la typologie "parcs linéaires", obtenu à partir d'inventaires de terrain (axe des x) et d'observations des orthomosaïques et des MNS générés à partir des images capturées par le drone (axe des y). Ce diagramme inclut une courbe de tendance illustrant une relation de proportionnalité parfaite entre les deux variables (situation théorique). (Production personnelle)

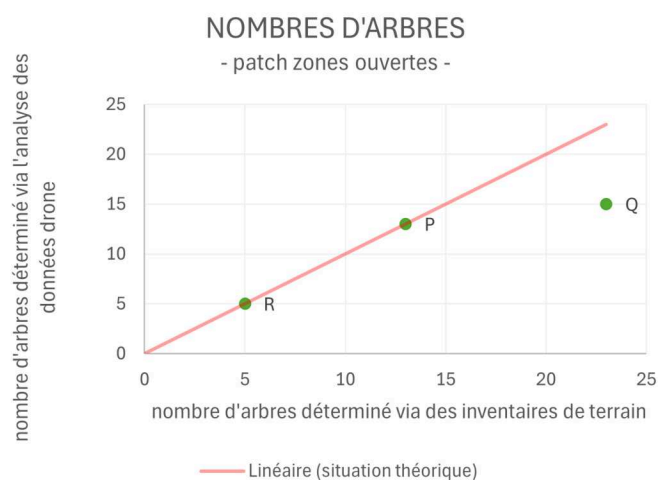


Figure 26.6. : Diagramme de dispersion du nombre d'arbres présents dans les quadrats P, Q et R de la typologie "zones ouvertes", obtenu à partir d'inventaires de terrain (axe des x) et d'observations des orthomosaïques et des MNS générés à partir des images capturées par le drone (axe des y). Ce diagramme inclut une courbe de tendance illustrant une relation de proportionnalité parfaite entre les deux variables (situation théorique). (Production personnelle)

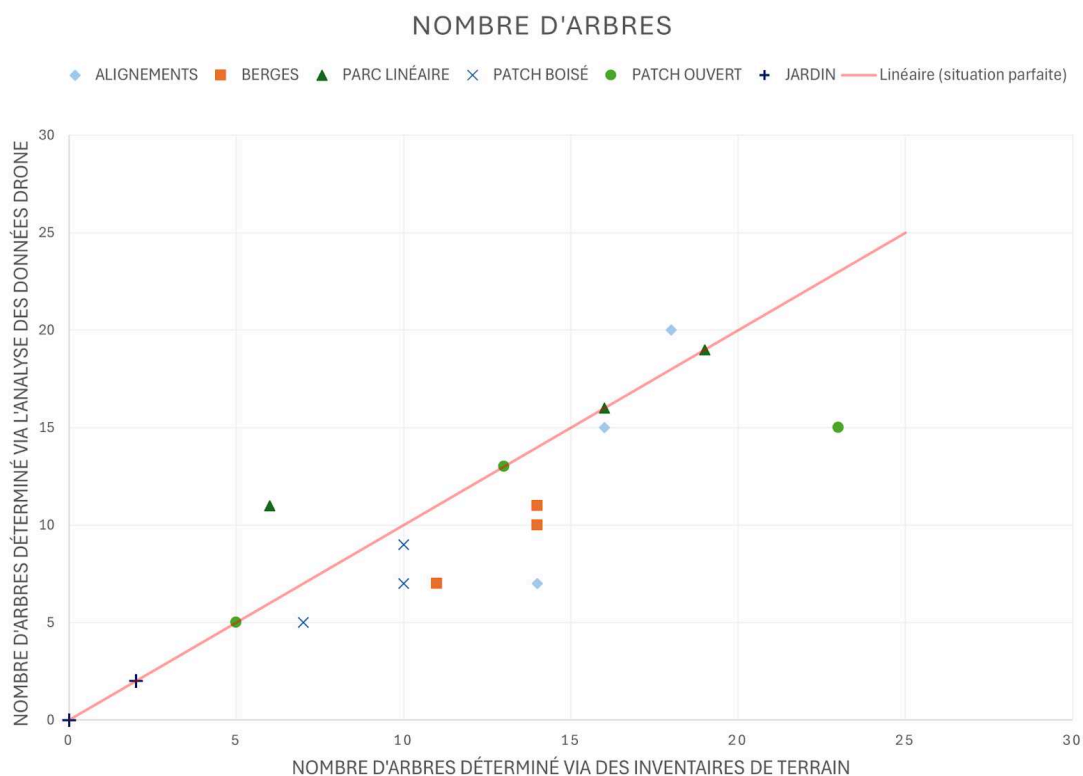


Figure 26.7. : Diagramme de dispersion du nombre d'arbres présents dans chaque typologie de végétation, obtenu à partir d'inventaires de terrain (axe des x) et d'observations des orthomosaïques et des MNS générés à partir des images capturées par le drone (axe des y). Ce diagramme inclut une courbe de tendance illustrant une relation de proportionnalité parfaite entre les deux variables (situation théorique). (Production personnelle)

ANNEXE 27 : Ensemble des résultats générés pour l'indicateur de richesse en espèces d'arbres dans le cadre de l'étude quantitative . Production personnelle.

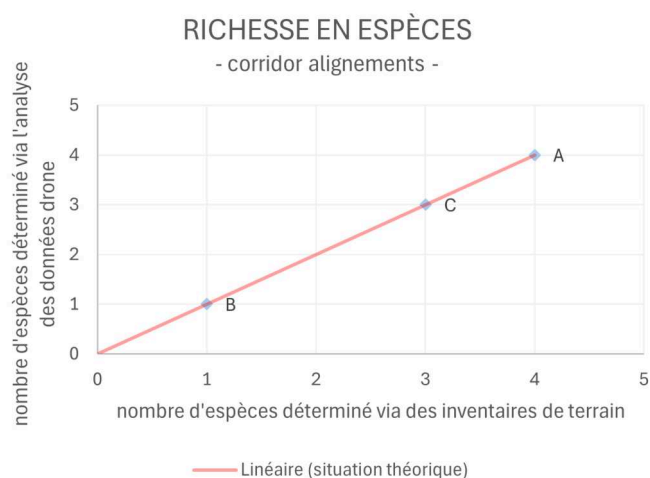


Figure 27.1 : Diagramme de dispersion du nombre d'espèces d'arbre présentes dans les quadrats A, B et C de la typologie "alignements", obtenu à partir d'inventaires de terrain (axe des x) et d'observations des orthomosaïques générées à partir des images capturées par le drone (axe des y). Ce diagramme inclut une courbe de tendance illustrant une relation de proportionnalité parfaite entre les deux variables (situation théorique). (Production personnelle)



Figure 27.2 : Diagramme de dispersion du nombre d'espèces d'arbre présentes dans les quadrats J, K et L de la typologie "zones boisées", obtenu à partir d'inventaires de terrain (axe des x) et d'observations des orthomosaïques générées à partir des images capturées par le drone (axe des y). Ce diagramme inclut une courbe de tendance illustrant une relation de proportionnalité parfaite entre les deux variables (situation théorique). (Production personnelle)

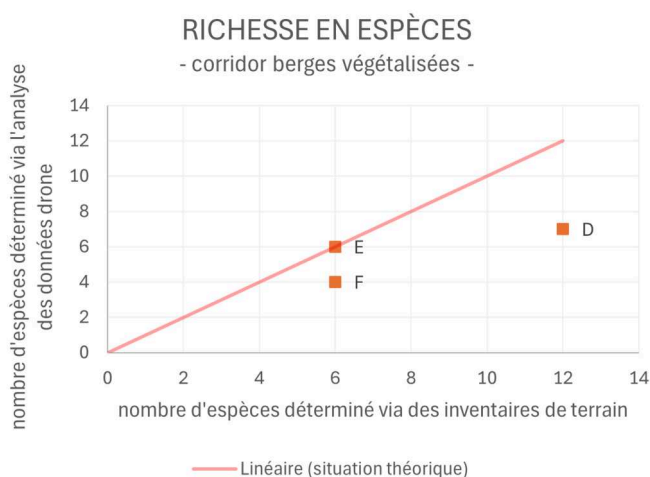


Figure 27.3 : Diagramme de dispersion du nombre d'espèces d'arbre présentes dans les quadrats D, E et F de la typologie "berges végétalisées", obtenu à partir d'inventaires de terrain (axe des x) et d'observations des orthomosaïques générées à partir des images capturées par le drone (axe des y). Ce diagramme inclut une courbe de tendance illustrant une relation de proportionnalité parfaite entre les deux variables (situation théorique). (Production personnelle)



Figure 27.4 : Diagramme de dispersion du nombre d'espèces d'arbre présentes dans les quadrats M, N et O de la typologie "zones de jardin", obtenu à partir d'inventaires de terrain (axe des x) et d'observations des orthomosaïques générées à partir des images capturées par le drone (axe des y). Ce diagramme inclut une courbe de tendance illustrant une relation de proportionnalité parfaite entre les deux variables (situation théorique). (Production personnelle)

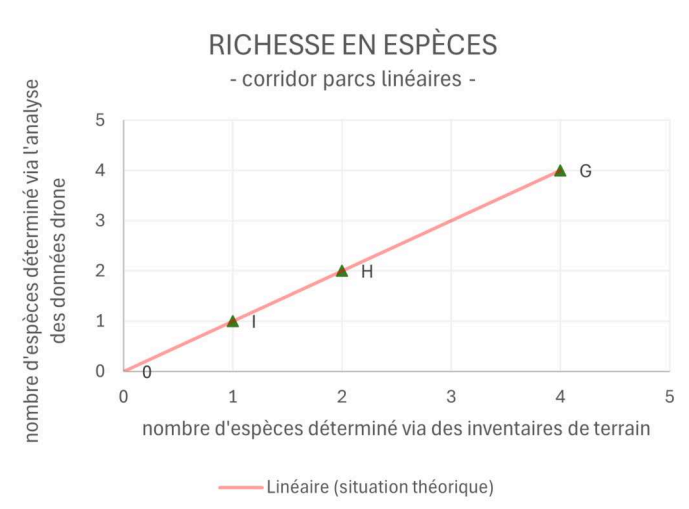


Figure 27.5 : Diagramme de dispersion du nombre d'espèces d'arbre présentes dans les quadrats G, H et I de la typologie "parcs linéaires", obtenu à partir d'inventaires de terrain (axe des x) et d'observations des orthomosaïques générées à partir des images capturées par le drone (axe des y). Ce diagramme inclut une courbe de tendance illustrant une relation de proportionnalité parfaite entre les deux variables (situation théorique). (Production personnelle)

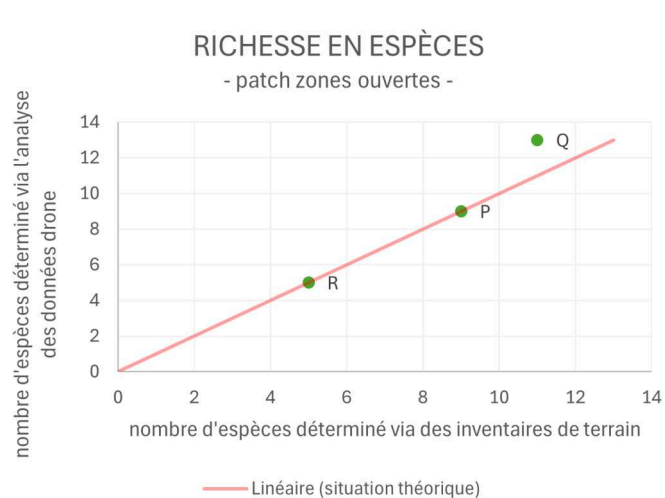


Figure 27.6 : Diagramme de dispersion du nombre d'espèces d'arbre présentes dans les quadrats P, Q et R de la typologie "zones ouvertes", obtenu à partir d'inventaires de terrain (axe des x) et d'observations des orthomosaïques générées à partir des images capturées par le drone (axe des y). Ce diagramme inclut une courbe de tendance illustrant une relation de proportionnalité parfaite entre les deux variables (situation théorique). (Production personnelle)

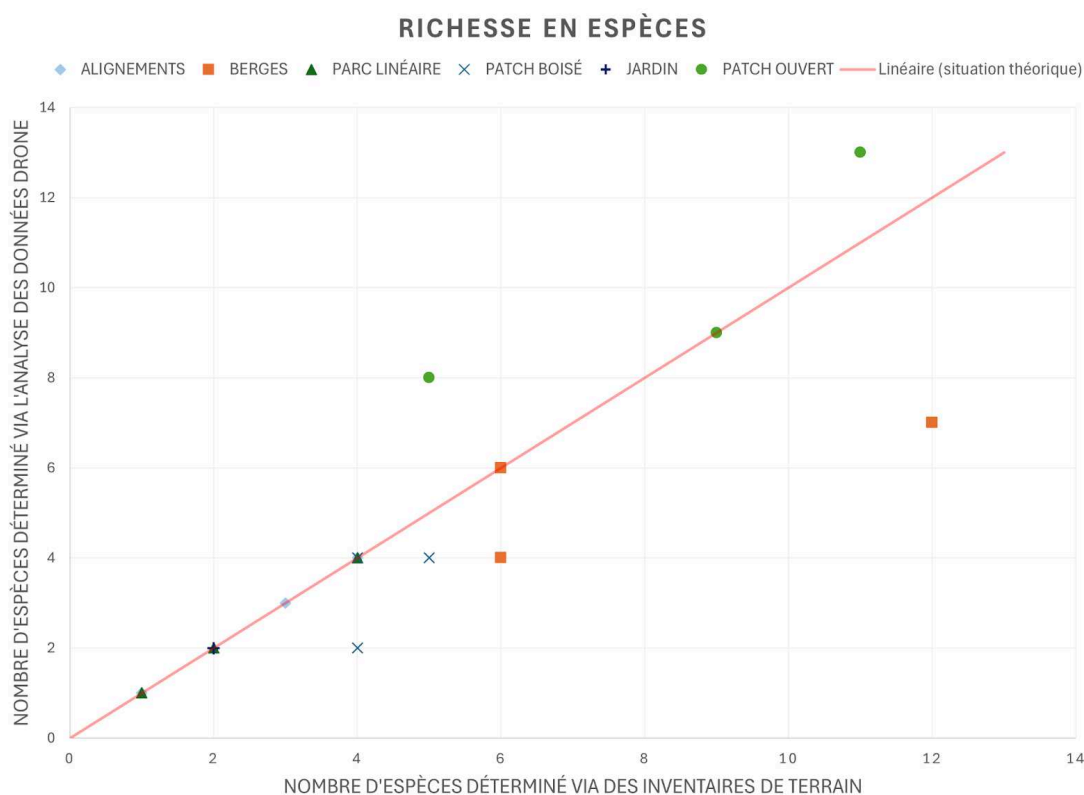


Figure 27.7 : Diagramme de dispersion du nombre d'espèces d'arbre présentes dans chaque typologie de végétation, obtenu à partir d'inventaires de terrain (axe des x) et d'observations des orthomosaïques générées à partir des images capturées par le drone (axe des y). Ce diagramme inclut une courbe de tendance illustrant une relation de proportionnalité parfaite entre les deux variables (situation théorique). (Production personnelle)

ANNEXE 28 : Ensemble des résultats générés pour l'indicateur de structure verticale de la strate arborée dans le cadre de l'étude quantitative . Production personnelle.

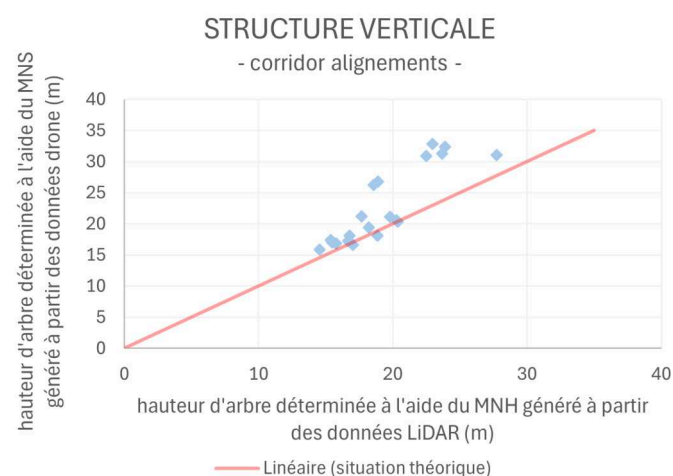


Figure 28.1 : Diagramme de dispersion de la hauteur des arbres présents dans la typologie "alignements", obtenue à partir des valeurs du MNH généré à partir de données LiDAR de 2021 (axe des x) et des valeurs des MNS générés à partir des images capturées par le drone (axe des y). Ce diagramme inclut une courbe de tendance illustrant une relation de proportionnalité parfaite entre les deux variables (situation théorique). (Production personnelle)

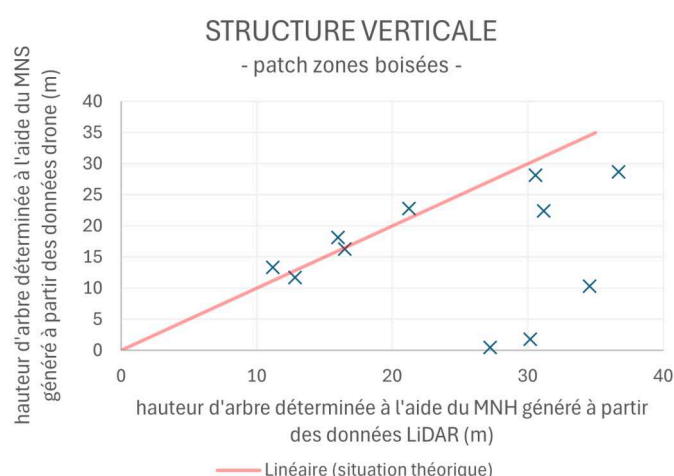


Figure 28.2 : Diagramme de dispersion de la hauteur des arbres présents dans la typologie "zones boisées", obtenue à partir des valeurs du MNH généré à partir de données LiDAR de 2021 (axe des x) et des valeurs des MNS générés à partir des images capturées par le drone (axe des y). Ce diagramme inclut une courbe de tendance illustrant une relation de proportionnalité parfaite entre les deux variables (situation théorique). (Production personnelle)

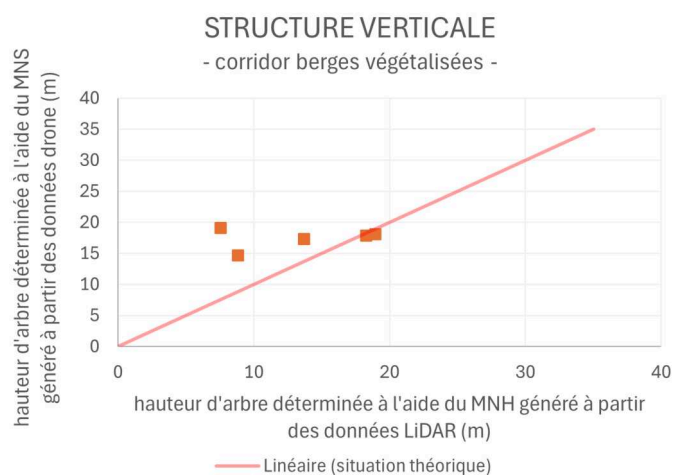


Figure 28.3 : Diagramme de dispersion de la hauteur des arbres présents dans la typologie "berges végétalisées", obtenue à partir des valeurs du MNH généré à partir de données LiDAR de 2021 (axe des x) et des valeurs des MNS générés à partir des images capturées par le drone (axe des y). Ce diagramme inclut une courbe de tendance illustrant une relation de proportionnalité parfaite entre les deux variables (situation théorique). (Production personnelle)

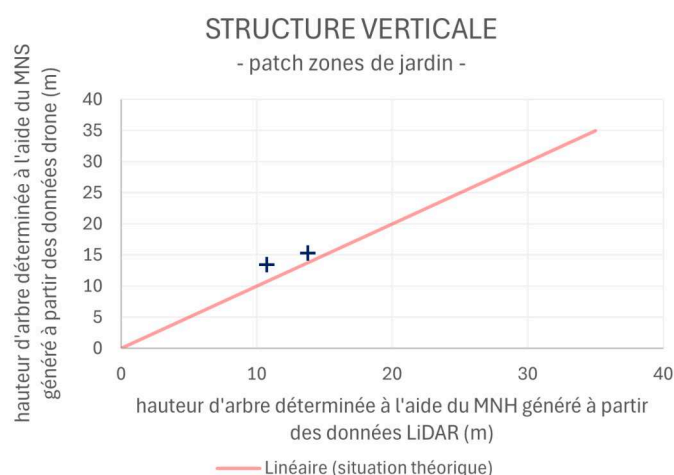


Figure 28.4 : Diagramme de dispersion de la hauteur des arbres présents dans la typologie "zones de jardin", obtenue à partir des valeurs du MNH généré à partir de données LiDAR de 2021 (axe des x) et des valeurs des MNS générés à partir des images capturées par le drone (axe des y). Ce diagramme inclut une courbe de tendance illustrant une relation de proportionnalité parfaite entre les deux variables (situation théorique). (Production personnelle)

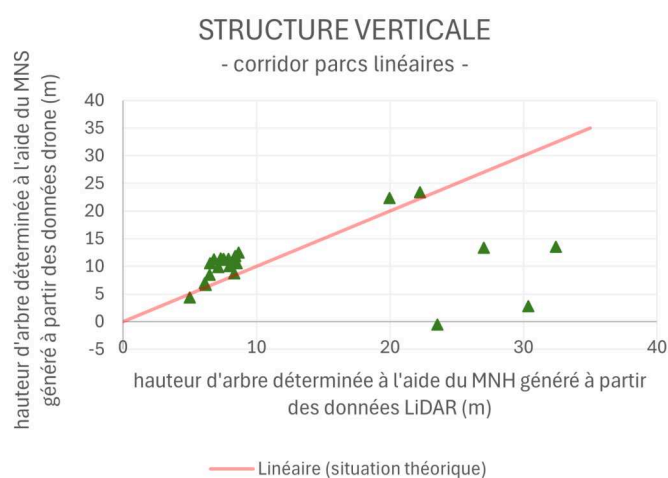


Figure 28.5. : Diagramme de dispersion de la hauteur des arbres présents dans la typologie "parcs linéaires", obtenue à partir des valeurs du MNH généré à partir de données LiDAR de 2021 (axe des x) et des valeurs des MNS générés à partir des images capturées par le drone (axe des y). Ce diagramme inclut une courbe de tendance illustrant une relation de proportionnalité parfaite entre les deux variables (situation théorique). (Production personnelle)

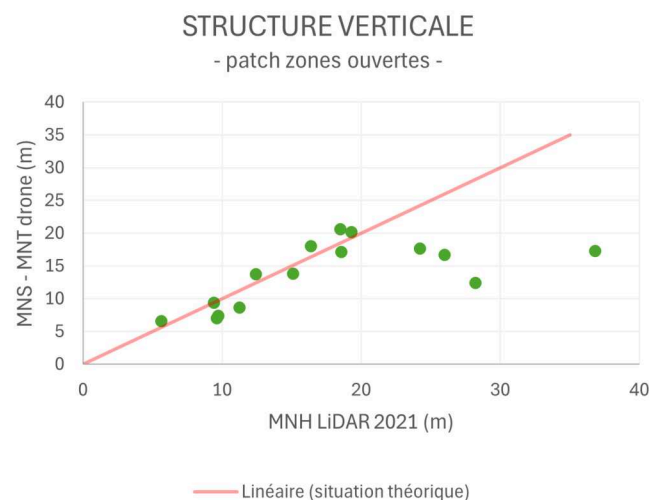


Figure 28.6. : Diagramme de dispersion de la hauteur des arbres présents dans la typologie "zones ouvertes", obtenue à partir des valeurs du MNH généré à partir de données LiDAR de 2021 (axe des x) et des valeurs des MNS générés à partir des images capturées par le drone (axe des y). Ce diagramme inclut une courbe de tendance illustrant une relation de proportionnalité parfaite entre les deux variables (situation théorique). (Production personnelle)

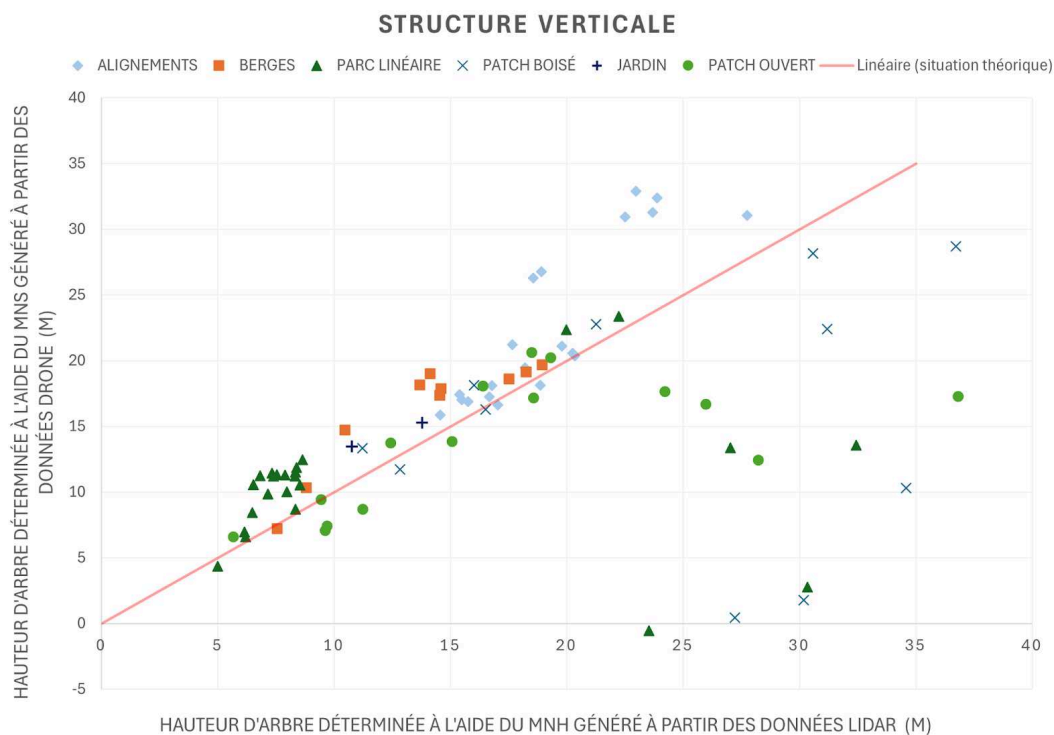


Figure 28.7. : Diagramme de dispersion de la hauteur des arbres présents dans chaque typologie de végétation, obtenue à partir des valeurs du MNH généré à partir de données LiDAR de 2021 (axe des x) et des valeurs des MNS générés à partir des images capturées par le drone (axe des y). Ce diagramme inclut une courbe de tendance illustrant une relation de proportionnalité parfaite entre les deux variables (situation théorique). (Production personnelle)

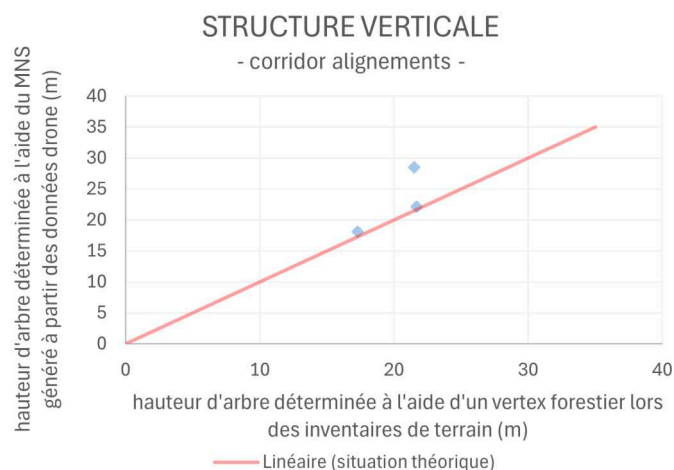


Figure 28.8. : Diagramme de dispersion de la hauteur d'un arbre par quadrat de la typologie "alignements", obtenue à partir d'inventaires de terrain, à l'aide d'un vertex forestier (axe des x) et des valeurs des MNS générés à partir des images capturées par le drone (axe des y). Ce diagramme inclut une courbe de tendance illustrant une relation de proportionnalité parfaite entre les deux variables (situation théorique). (Production personnelle)

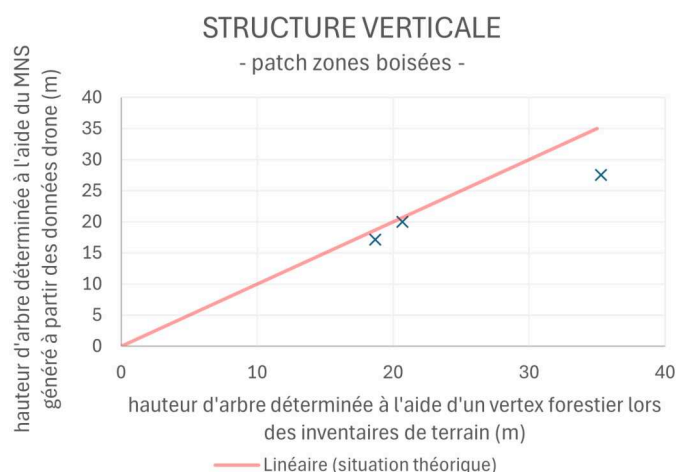


Figure 28.9. : Diagramme de dispersion de la hauteur d'un arbre par quadrat de la typologie "zones boisées", obtenue à partir d'inventaires de terrain, à l'aide d'un vertex forestier (axe des x) et des valeurs des MNS générés à partir des images capturées par le drone (axe des y). Ce diagramme inclut une courbe de tendance illustrant une relation de proportionnalité parfaite entre les deux variables (situation théorique). (Production personnelle)

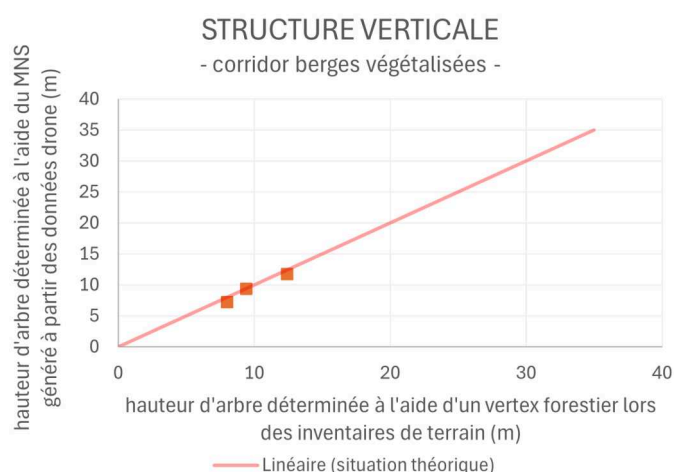


Figure 28.10. : Diagramme de dispersion de la hauteur d'un arbre par quadrat de la typologie "berges végétalisées", obtenue à partir d'inventaires de terrain, à l'aide d'un vertex forestier (axe des x) et des valeurs des MNS générés à partir des images capturées par le drone (axe des y). Ce diagramme inclut une courbe de tendance illustrant une relation de proportionnalité parfaite entre les deux variables (situation théorique). (Production personnelle)

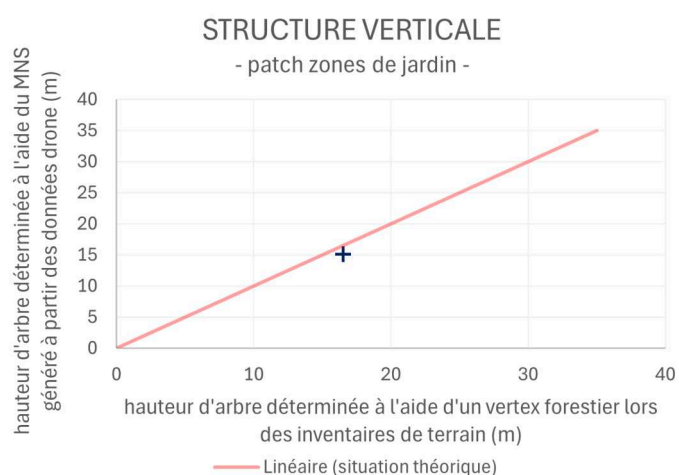


Figure 28.11. : Diagramme de dispersion de la hauteur d'un arbre par quadrat de la typologie "zones de jardin", obtenue à partir d'inventaires de terrain, à l'aide d'un vertex forestier (axe des x) et des valeurs des MNS générés à partir des images capturées par le drone (axe des y). Ce diagramme inclut une courbe de tendance illustrant une relation de proportionnalité parfaite entre les deux variables (situation théorique). (Production personnelle)

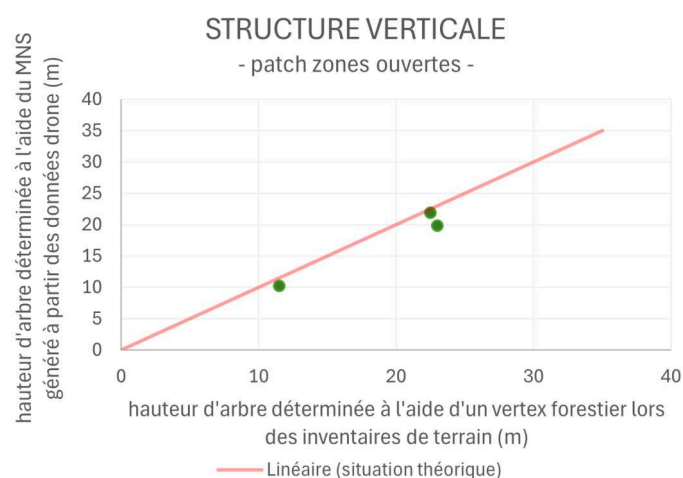
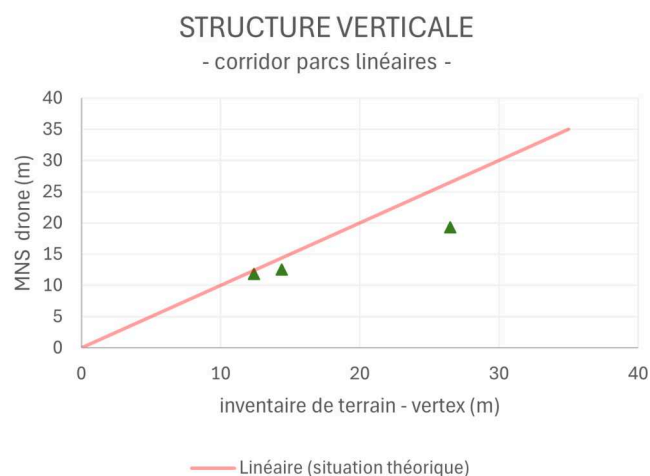


Figure 28.12. : Diagramme de dispersion de la hauteur d'un arbre par quadrat de la typologie "parcs linéaires", obtenue à partir d'inventaires de terrain, à l'aide d'un vertex forestier (axe des x) et des valeurs des MNS générés à partir des images capturées par le drone (axe des y). Ce diagramme inclut une courbe de tendance illustrant une relation de proportionnalité parfaite entre les deux variables (situation théorique). (Production personnelle)

Figure 28.13. : Diagramme de dispersion de la hauteur d'un arbre par quadrat de la typologie "zones ouvertes", obtenue à partir d'inventaires de terrain, à l'aide d'un vertex forestier (axe des x) et des valeurs des MNS générés à partir des images capturées par le drone (axe des y). Ce diagramme inclut une courbe de tendance illustrant une relation de proportionnalité parfaite entre les deux variables (situation théorique). (Production personnelle)

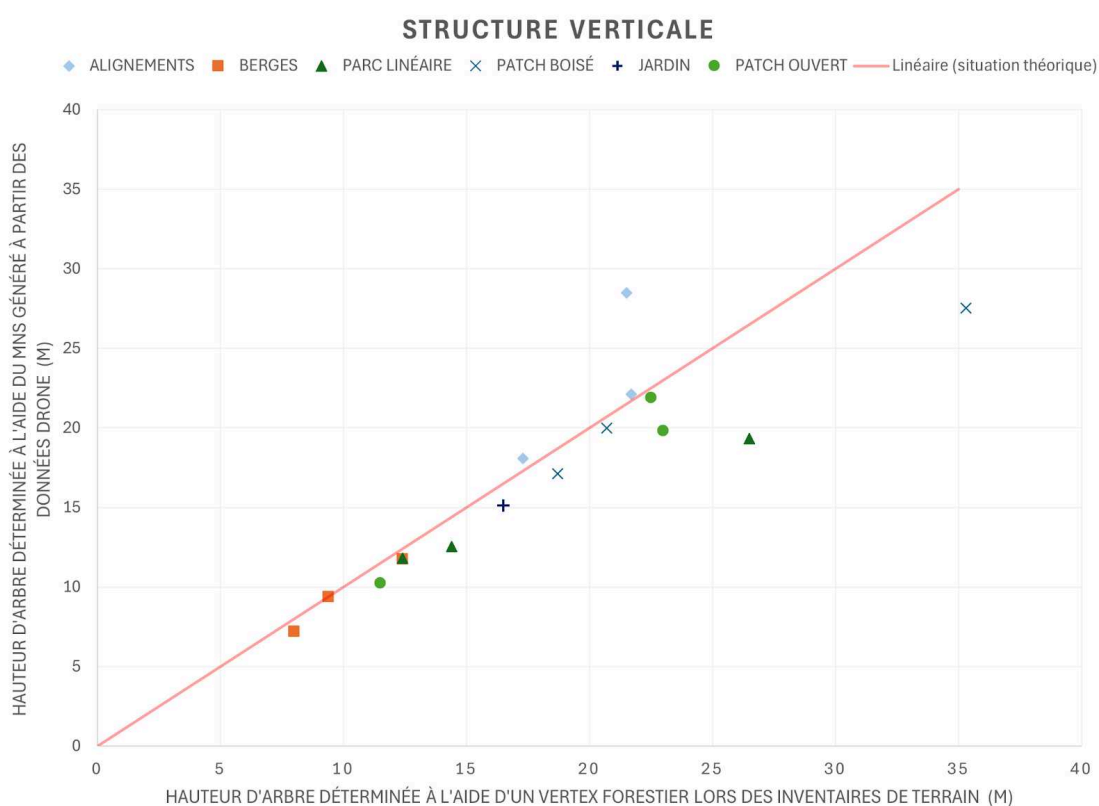


Figure 28.14. : Diagramme de dispersion de la hauteur d'un arbre par quadrat, obtenue à partir d'inventaires de terrain, à l'aide d'un vertex forestier (axe des x) et des valeurs des MNS générés à partir des images capturées par le drone (axe des y). Ce diagramme inclut une courbe de tendance illustrant une relation de proportionnalité parfaite entre les deux variables (situation théorique). (Production personnelle)

ANNEXE 29 : Ensemble des résultats générés pour l'indicateur d'aire de la couronne dans le cadre de l'étude quantitative . Production personnelle.

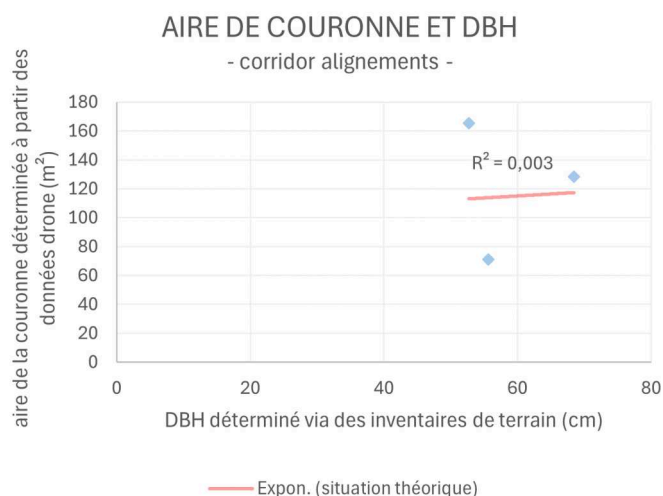


Figure 29.1 : Diagramme de dispersion illustrant la relation entre le DBH d'un arbre par quadrat de la typologie "alignements", obtenu à partir d'inventaires de terrain (axe des x) et l'aire de sa couronne, obtenue via la mesure des orthomosaïques générées à partir des images capturées par le drone (axe des y). Ce diagramme inclut une courbe de tendance exponentielle ($R^2=0,003$) illustrant une corrélation entre les deux variables (situation théorique). (Production personnelle)

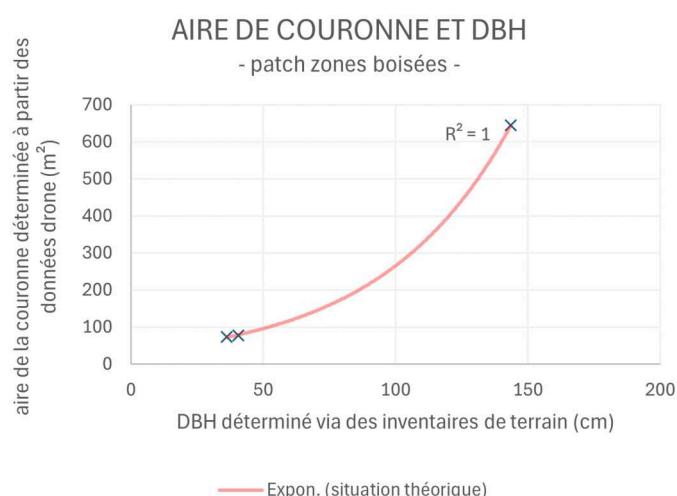


Figure 29.2 : Diagramme de dispersion illustrant la relation entre le DBH d'un arbre par quadrat de la typologie "zones boisées", obtenu à partir d'inventaires de terrain (axe des x) et l'aire de sa couronne, obtenue via la mesure des orthomosaïques générées à partir des images capturées par le drone (axe des y). Ce diagramme inclut une courbe de tendance exponentielle ($R^2=1$) illustrant une corrélation entre les deux variables (situation théorique). (Production personnelle)

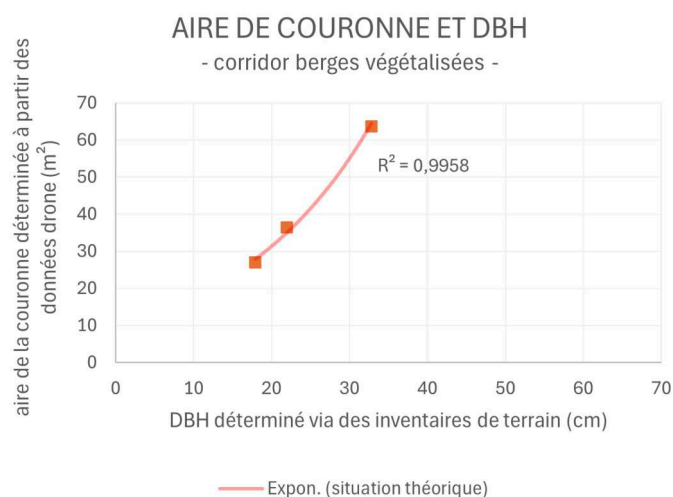


Figure 29.3 : Diagramme de dispersion illustrant la relation entre le DBH d'un arbre par quadrat de la typologie "berges végétalisées", obtenu à partir d'inventaires de terrain (axe des x) et l'aire de sa couronne, obtenue via la mesure des orthomosaïques générées à partir des images capturées par le drone (axe des y). Ce diagramme inclut une courbe de tendance exponentielle ($R^2=0,9958$) illustrant une corrélation entre les deux variables (situation théorique). (Production personnelle)



Figure 29.4 : Diagramme de dispersion illustrant la relation entre le DBH d'un arbre par quadrat de la typologie "zones de jardin", obtenu à partir d'inventaires de terrain (axe des x) et l'aire de sa couronne, obtenue via la mesure des orthomosaïques générées à partir des images capturées par le drone (axe des y). (Production personnelle)

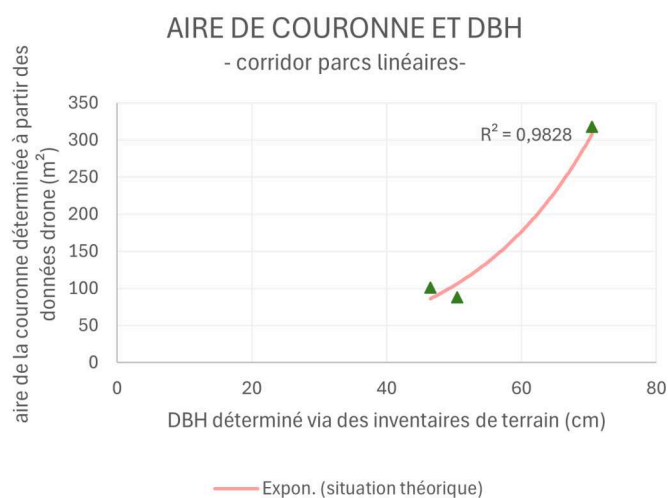


Figure 29.5. : Diagramme de dispersion illustrant la relation entre le DBH d'un arbre par quadrat de la typologie "parcs linéaires", obtenu à partir d'inventaires de terrain (axe des x) et l'aire de sa couronne, obtenue via la mesure des orthomosaïques générées à partir des images capturées par le drone (axe des y). Ce diagramme inclut une courbe de tendance exponentielle ($R^2=0,9828$) illustrant une corrélation entre les deux variables (situation théorique). (Production personnelle)

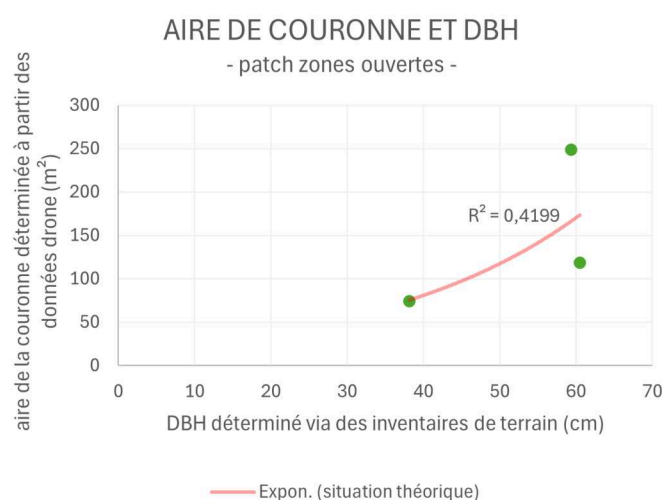


Figure 29.6. : Diagramme de dispersion illustrant la relation entre le DBH d'un arbre par quadrat de la typologie "zones ouvertes", obtenu à partir d'inventaires de terrain (axe des x) et l'aire de sa couronne, obtenue via la mesure des orthomosaïques générées à partir des images capturées par le drone (axe des y). Ce diagramme inclut une courbe de tendance exponentielle ($R^2=0,4199$) illustrant une corrélation entre les deux variables (situation théorique). (Production personnelle)

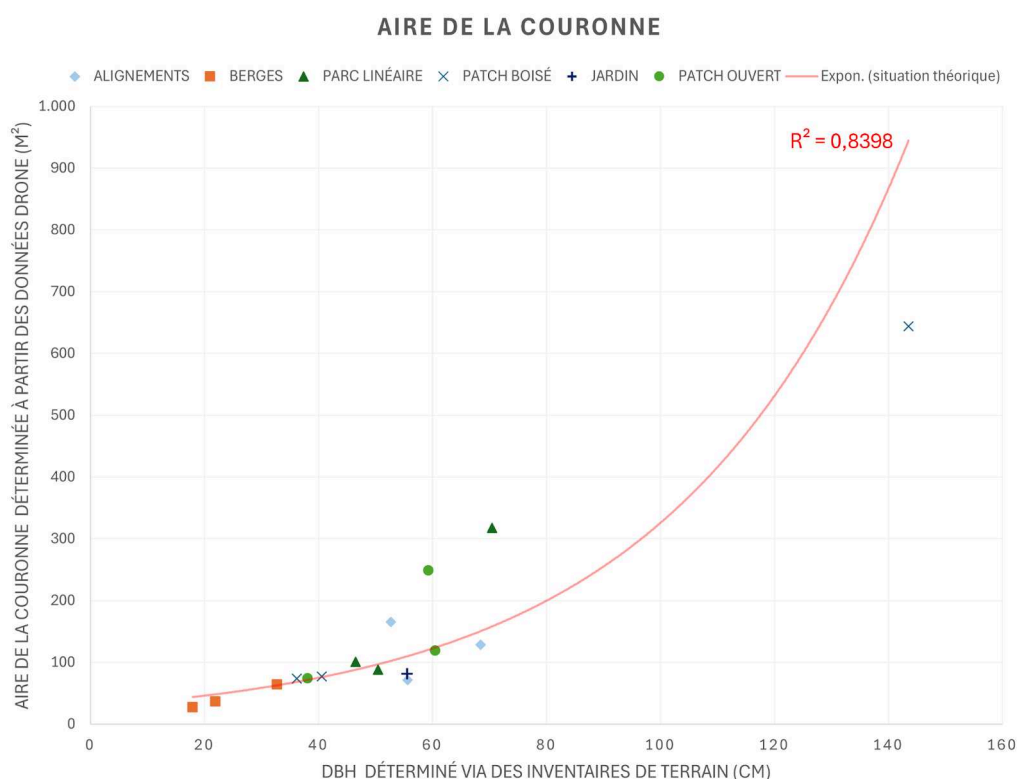


Figure 29.7. : Diagramme de dispersion illustrant la relation entre le DBH d'un arbre par quadrat, obtenu à partir d'inventaires de terrain (axe des x) et l'aire de sa couronne, obtenue via la mesure des orthomosaïques générées à partir des images capturées par le drone (axe des y). Ce diagramme inclut une courbe de tendance exponentielle ($R^2=0,8398$) illustrant une corrélation entre les deux variables (situation théorique). (Production personnelle)

ANNEXE 30 : Ensemble des résultats générés pour l'indicateur de recouvrement des strates végétales dans le cadre de l'étude quantitative . Production personnelle.

Tableau 30.1 : Tableau des pourcentages de recouvrement de chaque strate végétale, dans les quadrats A, B et C de la typologie "alignements" obtenus à partir d'inventaires de terrain (colonne de gauche) et d'observations des orthomosaiques et des MNS générés à partir des images capturées par le drone (colonne de droite) pour la typologie corridor - alignements d'arbres. (Production personnelle).

TYPOLOGIE CORRIDOR ALIGNEMENTS D'ARBRES DE RUE								
QUADRATS	STRATE ARBORÉE		STRATE ARBUSTIVE		STRATE HERBACÉE HAUTE		STRATE HERBACÉE BASSE	
	TERRAIN	DRONE	TERRAIN	DRONE	TERRAIN	DRONE	TERRAIN	DRONE
A	25%	25%	10%	10%	-	-	25%	2%
B	90%	90%	-	-	2%	2%	25%	-
C	20%	20%	10%	10%	-	-	25%	5%

Tableau 30.2 : Tableau des pourcentages de recouvrement de chaque strate végétale, dans les quadrats D, E et F de la typologie "berges végétalisées" obtenus à partir d'inventaires de terrain (colonne de gauche) et d'observations des orthomosaiques et des MNS générés à partir des images capturées par le drone (colonne de droite) pour la typologie corridor - alignements d'arbres. (Production personnelle).

TYPOLOGIE CORRIDOR BERGES VÉGÉTALISÉES								
QUADRATS	STRATE ARBORÉE		STRATE ARBUSTIVE		STRATE HERBACÉE HAUTE		STRATE HERBACÉE BASSE	
	TERRAIN	DRONE	TERRAIN	DRONE	TERRAIN	DRONE	TERRAIN	DRONE
D	20%	20%	-	-	12%	10%	60%	40%
E	35%	35%	-	-	15%	10%	55%	20%
F	17%	17%	-	-	5%	5%	65%	50%

Tableau 30.3 : Tableau des pourcentages de recouvrement de chaque strate végétale, dans les quadrats G, H et I de la typologie "parcs linéaires" obtenus à partir d'inventaires de terrain (colonne de gauche) et d'observations des orthomosaiques et des MNS générés à partir des images capturées par le drone (colonne de droite) pour la typologie corridor - alignements d'arbres. (Production personnelle).

TYPOLOGIE CORRIDOR PARCS LINÉAIRES								
QUADRATS	STRATE ARBORÉE		STRATE ARBUSTIVE		STRATE HERBACÉE HAUTE		STRATE HERBACÉE BASSE	
	TERRAIN	DRONE	TERRAIN	DRONE	TERRAIN	DRONE	TERRAIN	DRONE
G	40%	40%	4,5%	3%	2%	-	23%	20%
H	25%	25%	-	-	2%	-	25%	22%
I	75%	67%	-	-	-	-	5%	-

Tableau 30.4. : Tableau des pourcentages de recouvrement de chaque strate végétale, dans les quadrats J, K et L de la typologie "zones boisées" obtenus à partir d'inventaires de terrain (colonne de gauche) et d'observations des orthomosaïques et des MNS générés à partir des images capturées par le drone (colonne de droite) pour la typologie corridor - alignements d'arbres. (Production personnelle).

TYPOLOGIE PATCH ZONES BOISÉES								
QUADRATS	STRATE ARBORÉE		STRATE ARBUSTIVE		STRATE HERBACÉE HAUTE		STRATE HERBACÉE BASSE	
	TERRAIN	DRONE	TERRAIN	DRONE	TERRAIN	DRONE	TERRAIN	DRONE
J	35%	35%	4%	2%	2%	-	20%	10%
K	85%	70%	-	-	-	-	30%	5%
L	60%	60%	2%	-	-	-	45%	25%

Tableau 30.5. : Tableau des pourcentages de recouvrement de chaque strate végétale, dans les quadrats M, N et O de la typologie "zones de jardin" obtenus à partir d'inventaires de terrain (colonne de gauche) et d'observations des orthomosaïques et des MNS générés à partir des images capturées par le drone (colonne de droite) pour la typologie corridor - alignements d'arbres. (Production personnelle).

TYPOLOGIE PATCH ZONES DE JARDIN								
QUADRATS	STRATE ARBORÉE		STRATE ARBUSTIVE		STRATE HERBACÉE HAUTE		STRATE HERBACÉE BASSE	
	TERRAIN	DRONE	TERRAIN	DRONE	TERRAIN	DRONE	TERRAIN	DRONE
M	-	-	1%	-	5%	5%	70%	70%
N	-	-	10%	10%	-	-	40%	40%
O	5%	5%	20%	20%	-	-	30%	30%

Tableau 30.6. : Tableau des pourcentages de recouvrement de chaque strate végétale, dans les quadrats P, Q et R de la typologie "zones ouvertes" obtenus à partir d'inventaires de terrain (colonne de gauche) et d'observations des orthomosaïques et des MNS générés à partir des images capturées par le drone (colonne de droite) pour la typologie corridor - alignements d'arbres. (Production personnelle).

TYPOLOGIE CORRIDOR PATCH ZONES OUVERTES								
QUADRATS	STRATE ARBORÉE		STRATE ARBUSTIVE		STRATE HERBACÉE HAUTE		STRATE HERBACÉE BASSE	
	TERRAIN	DRONE	TERRAIN	DRONE	TERRAIN	DRONE	TERRAIN	DRONE
P	40%	40%	3%	1%	8%	-	35%	20%
Q	35%	35%	7%	8%	3%	-	55%	25%
R	40%	40%	-	-	-	-	90%	60%

ANNEXE 31 : Ensemble des résultats générés pour l'indicateur de recouvrement des strates végétales dans le cadre de l'étude quantitative . Production personnelle.

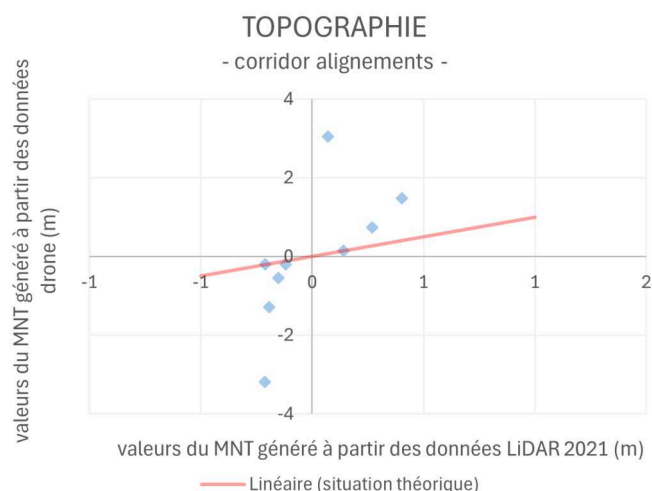


Figure 31.1. : Diagramme de dispersion des différences altimétriques entre trois points sélectionnés aléatoirement au sein de chaque quadrat (A, B et C) de la typologie "alignements", obtenues à partir des valeurs du MNT généré à partir de données LiDAR de 2021 (axe des x) et des valeurs des MNT générés à partir des images capturées par le drone (axe des y). Ce diagramme inclut une courbe de tendance illustrant une relation de proportionnalité parfaite entre les deux variables (situation théorique). (Production personnelle)

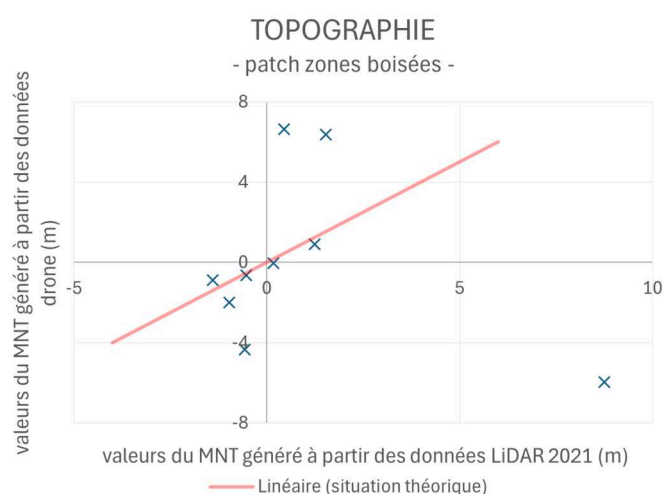


Figure 31.2. : Diagramme de dispersion des différences altimétriques entre trois points sélectionnés aléatoirement au sein de chaque quadrat (A, B et C) de la typologie "zones boisées", obtenues à partir des valeurs du MNT généré à partir de données LiDAR de 2021 (axe des x) et des valeurs des MNT générés à partir des images capturées par le drone (axe des y). Ce diagramme inclut une courbe de tendance illustrant une relation de proportionnalité parfaite entre les deux variables (situation théorique). (Production personnelle)

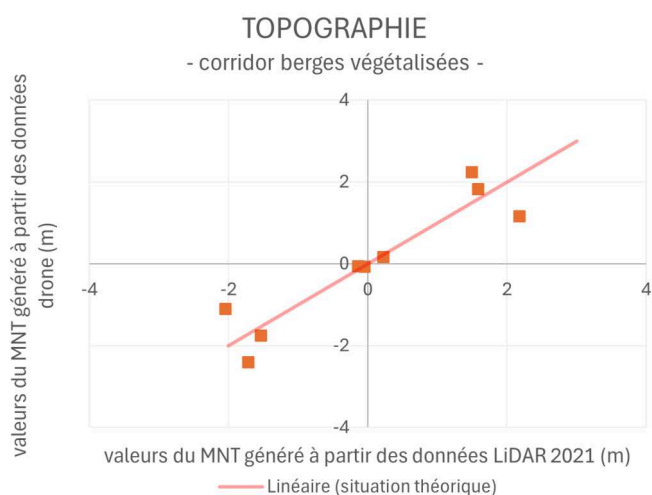


Figure 31.3. : Diagramme de dispersion des différences altimétriques entre trois points sélectionnés aléatoirement au sein de chaque quadrat (A, B et C) de la typologie "berges végétalisées", obtenues à partir des valeurs du MNT généré à partir de données LiDAR de 2021 (axe des x) et des valeurs des MNT générés à partir des images capturées par le drone (axe des y). Ce diagramme inclut une courbe de tendance illustrant une relation de proportionnalité parfaite entre les deux variables (situation théorique). (Production personnelle)

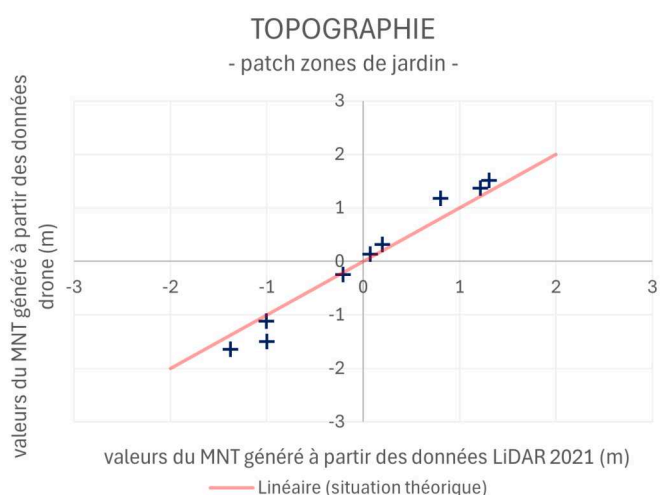


Figure 31.4. : Diagramme de dispersion des différences altimétriques entre trois points sélectionnés aléatoirement au sein de chaque quadrat (A, B et C) de la typologie "zones de jardin", obtenues à partir des valeurs du MNT généré à partir de données LiDAR de 2021 (axe des x) et des valeurs des MNT générés à partir des images capturées par le drone (axe des y). Ce diagramme inclut une courbe de tendance illustrant une relation de proportionnalité parfaite entre les deux variables (situation théorique). (Production personnelle)

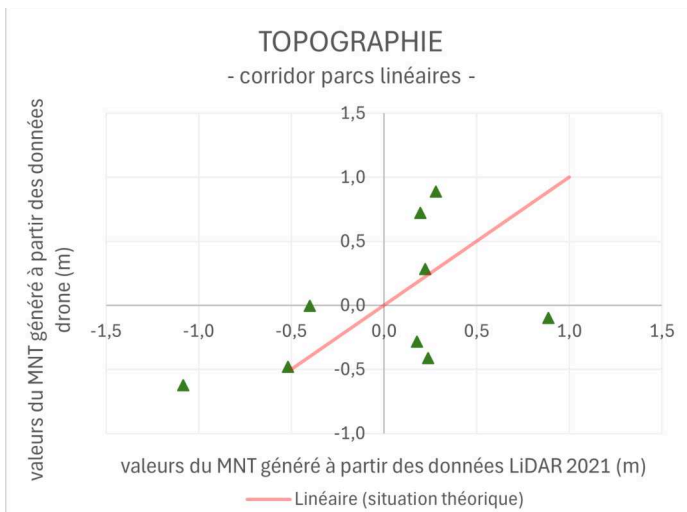


Figure 31.5. : Diagramme de dispersion des différences altimétriques entre trois points sélectionnés aléatoirement au sein de chaque quadrat (A, B et C) de la typologie "parcs linéaires", obtenues à partir des valeurs du MNT généré à partir de données LiDAR de 2021 (axe des x) et des valeurs des MNT générés à partir des images capturées par le drone (axe des y). Ce diagramme inclut une courbe de tendance illustrant une relation de proportionnalité parfaite entre les deux variables (situation théorique). (Production personnelle)

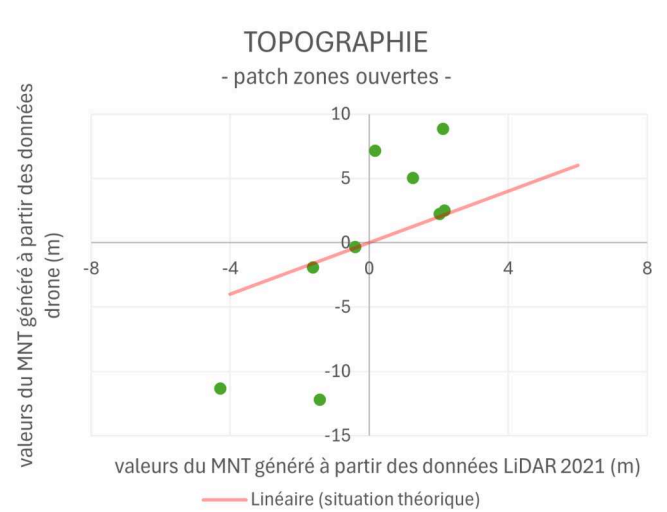


Figure 31.6. : Diagramme de dispersion des différences altimétriques entre trois points sélectionnés aléatoirement au sein de chaque quadrat (A, B et C) de la typologie "zones ouvertes", obtenues à partir des valeurs du MNT généré à partir de données LiDAR de 2021 (axe des x) et des valeurs des MNT générés à partir des images capturées par le drone (axe des y). Ce diagramme inclut une courbe de tendance illustrant une relation de proportionnalité parfaite entre les deux variables (situation théorique). (Production personnelle)

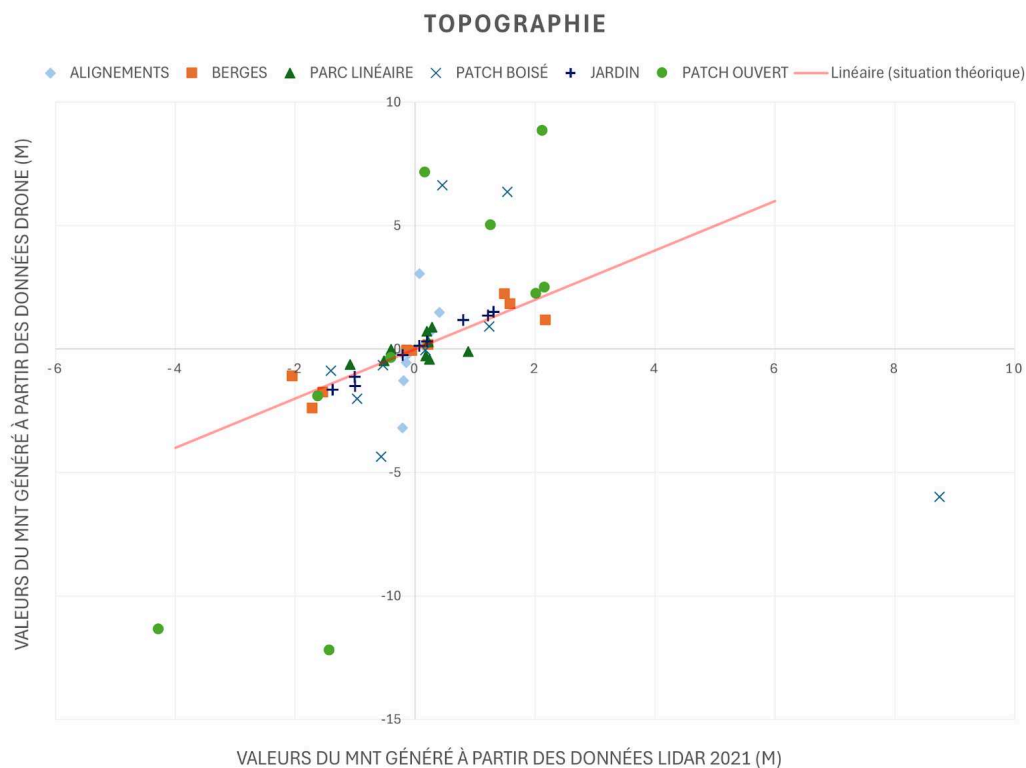


Figure 31.7. : Diagramme de dispersion des différences altimétriques entre trois points sélectionnés aléatoirement au sein de chaque quadrat (A, B et C), obtenues à partir des valeurs du MNT généré à partir de données LiDAR de 2021 (axe des x) et des valeurs des MNT générés à partir des images capturées par le drone (axe des y). Ce diagramme inclut une courbe de tendance illustrant une relation de proportionnalité parfaite entre les deux variables (situation théorique). (Production personnelle)