

Université de Toulouse

MASTER 2 GEOMATIQUE

"Sciences Géomatiques en environnement et Aménagement" (**SIGMA**)

<http://sigma.univ-toulouse.fr>



RAPPORT DE MASTER 2

**Photogrammétrie et Identification
Forestière**

Analyse Comparative des Logiciels et Méthodes

AGUIAR MARTIN Felipe



Tuteur de stage : Alain Posty

Enseignant-référent : Marc Lang

Août 2024

Sommaire

1.	Présentation de l'organisme	6
2.	Introduction	7
2.1.	La forêt française.....	7
2.2.	Télédétection : usage du drone en foret.....	8
2.3.	Objectif de l'étude.....	9
2.4.	Zone d'étude.....	10
3.	Photogrammétrie.....	11
3.1.	Introduction à la photogrammétrie	11
3.2.	Acquisition de données.....	12
3.3.	Matériel et données : drone et images RGB	13
3.4.	Présentation des logiciels et méthode mise en place pour la comparaison.....	14
3.4.1.	Logiciels	14
3.4.2.	Méthode	16
3.5.	Comparaison des logiciels de photogrammétrie et résultats obtenus.....	20
3.5.1.	Critères Quantitatifs.....	23
3.5.2.	Critères Qualitatifs	28
4.	Identification des arbres	31
4.1.	Introduction à l'identification.....	31
4.2.	Détection des arbres.....	34
4.2.1.	Introduction sur la méthode de détection des arbres	34
4.2.2.	Méthode retenue : DeepForest.....	34
4.2.3.	Résultats	35
4.3.	Segmentation des houppiers	36
4.3.1.	Introduction sur les différentes méthodes de segmentation	36
4.3.2.	Méthode de segmentation retenue : YOLO.....	38
4.3.3.	Résultats	40
4.4.	Synthèse des méthodes d'identification et discussion.....	42
5.	Conclusion sur les analyses, comparaison de méthodes et résultats	42
6.	Retour d'expérience	43
7.	Bibliographie	45
8.	Annexes	48
8.1.	Annexe A : Diagramme de Gantt	48
8.2.	Annexe B : Tutoriels	49
8.3.	Annexe C : Échanges et versions Micmac.....	50

Table des Figures et de Tableaux

Figure 1 - Bois et forêts en France. Centre National Propriété Forestière (CNPF, 2019)	7
Figure 2 - Produits de télédétection : drone, avion, satellite (Auteur, 2024)	8
Figure 3 - Flux de travail général.....	9
Figure 4 - Carte de localisation de la zone d'étude.....	10
Figure 5 - Flux de traitement photogrammétrique.....	12
Figure 6 - Carte des données IGN de référence altimétrique et planimétrique.....	17
Figure 7 - Carte des échantillons pour le calcul de la précision planimétrique.	18
Figure 8 - Carte des échantillons pour le calcul de la précision altimétrique.	19
Figure 9 - Résultats des traitements photogrammétiques.....	22
Figure 10 - Box-plot des distances des échantillons par rapport à la référence IGN.	26
Figure 11 - Box-plot des hauteurs des échantillons par rapport à la référence IGN.	27
Figure 12 - Profil de trace topographique.	27
Figure 13 - Comparatif entre MNH issus des données photogrammétiques et LiDAR.....	28
Figure 14 - Exemple de bruits marginaux issus des traitements photogrammétiques.....	30
Figure 15 - Méthodes d'identification.....	32
Figure 16 - Carte de dénombrement d'arbres par photo-interprétation.	33
Figure 17 - Flux de traitement de détection basée sur me relief Apex - SAGA.	34
Figure 18 - Flux de traitements pour la détection avec l'algorithme DeepForest.	35
Figure 19 - Carte des résultats du traitement de détection par la méthode DeepForest.	36
Figure 20 - Flux de traitements de segmentation Watershed.....	37
Figure 21 - Plug-in Deepness sur QGIS.	38
Figure 22 - Flux de travail de segmentation YOLO via interfaces graphiques.....	39
Figure 23 - Comptage des arbres par calcul des centroïdes des polygones segmentés.....	39
Figure 24 - Exemple de labellisation en excluant les éléments marginaux.	39
Figure 25 - Résultat de la segmentation par la méthode YOLO.....	40
Figure 26 - Graphique des statistiques d'entraînement.....	41
Figure 27 – Comparaison du dénombrement YOLO vs validation par photo-interprétation....	41
 Tableau 1 - Spécifications techniques et paramètres de vol (DJI).	13
Tableau 2 - Tableau des logiciels.	14
Tableau 3 - Tableau comparatif des résultats entre logiciel.	21
Tableau 4 - Informations techniques de l'équipement.....	21
Tableau 5 - Résultats des nuages de points dense.	23
Tableau 6 - Résultats des orthomosaïques.	24
Tableau 7 - Résultats des Modèle Numériques de Surface.....	24
Tableau 8 - Résultats des précisions planimétriques.....	25
Tableau 9 - Tableau et échantillons de comparaison de la précision planimétrique.....	25
Tableau 10 - Résultats des précisions altimétriques.....	26
Tableau 11 - Tableau des échantillons de comparaison de la précision altimétrique.	26
Tableau 12 - Langues disponibles d'utilisation dans les logiciels.	28
Tableau 13 - Classification de facilité d'utilisation.	29
Tableau 14 - Classification de facilité d'installation.	29
Tableau 15 - Classification de possibilité de personnalisation des traitements.	30
Tableau 16 - Classification de présence de bruits.	30
Tableau 17 - Coût des logiciels de photogrammétrie.....	31

Résumé

Les drones sont de plus en plus utilisés pour l'analyse forestière en télédétection, en raison de leur rapidité de mise en place, leur fine résolution spatiale et leur bonne précision géographique. Cette étude, réalisée en alternance au Centre National de la Propriété Forestière (CNPF), vise à comparer des logiciels de photogrammétrie (Agisoft Metashape, Pix4D Mapper, WebODM et Micmac) ainsi que des méthodes d'identification des arbres (Apex, Watershed, DeepForest et YOLO) pour l'analyse forestière, à partir d'images Red, Green, Blue (RGB) collectées par drone.

L'objectif est d'évaluer les logiciels selon des critères quantitatifs (résolution, précision, temps de traitement) et qualitatifs (facilité d'utilisation, installation, coût), tout en mettant en place une chaîne de traitements. L'étude examine également différentes méthodes d'identification des arbres, telles que la détection et la segmentation, pour individualiser les houppiers et réaliser un pré-diagnostic parcellaire.

Les traitements photogrammétriques génèrent des nuages de points, des modèles numériques de surface et des orthomosaïques. Les traitements d'identification fournissent des points identifiant chaque arbre et des segments délimitant les houppiers.

Chaque logiciel présente des avantages et des inconvénients : Agisoft Metashape est rapide mais avec une densité de points moindre ; Pix4D Mapper offre une haute résolution mais est plus lent ; WebODM est gratuit et facile à utiliser, mais nécessite Linux ; Micmac est efficace pour les orthomosaïques, mais a des problèmes liés à son développement.

Pour les méthodes d'identification, Apex et Watershed sont complémentaires pour le traitement des données de relief, tandis que YOLO est plus efficace et précis que DeepForest pour les données d'orthomosaïques.

Mots clés : Drone, YOLO, Segmentation, Forêt, Analyse parcellaire.

Abstract

Drones are increasingly used for forest analysis in remote sensing due to their speed, high spatial resolution, and good geographic accuracy. This study, conducted during an internship at the National Center for Forest Property (CNPF), compares photogrammetry software (Agisoft Metashape, Pix4D Mapper, WebODM, and Micmac) and tree identification methods (Apex, Watershed, DeepForest, and YOLO) for forest analysis using RGB images collected by drones.

The goal is to evaluate the software based on quantitative criteria (resolution, accuracy, processing time) and qualitative criteria (ease of use, installation, cost), while setting up a processing workflow. The study also examines different tree identification methods, such as detection and segmentation, to individualize the tree canopies and perform a preliminary plot diagnosis.

Photogrammetric processing generates point clouds, digital surface models, and orthomosaics. Identification processing provides points identifying each tree and vector segments outlining the canopies.

Each software has its pros and cons: Agisoft Metashape is fast but has lower point cloud density; Pix4D Mapper offers high resolution but is slower; WebODM is free and easy to use but requires Linux; Micmac is effective for orthomosaics but has development issues.

For identification methods, Apex and Watershed are complementary for processing relief data, while YOLO is more effective and precise compared to DeepForest for orthomosaic data.

Keywords : Drone, YOLO, Segmentation, Forest, Parcel Analysis.

1. Présentation de l'organisme

Le Centre National de la Propriété Forestière (CNPF), établissement public administratif, a été établi en 1963 avec pour objectif principal de promouvoir le développement, la gestion et l'amélioration de la production des forêts privées en France. Placé sous la tutelle du Ministère de l'Agriculture et de la Souveraineté alimentaire, le CNPF exerce diverses responsabilités, telles que l'orientation de la gestion forestière à travers l'élaboration de schémas régionaux de gestion forestière et de codes de bonnes pratiques sylvicoles, le conseil et la formation des propriétaires forestiers, ainsi que le regroupement des propriétaires pour faciliter la gestion forestière.

Le CNPF est au service des quelques 3,5 millions de propriétaires forestiers (représentant 75 % du couvert forestier français), couvrant environ 11 millions d'hectares, ce qui représente environ 20 % du territoire français.

Le CNPF collabore étroitement avec les délégations régionales intitulées Centres Régionaux de la Propriété Forestière (CRPF). Ces entités régionales, établies aussi en 1963, sont chargées d'orienter et de développer la gestion concertée des territoires forestiers au niveau régional.

Au sein du CNPF, il existe l'Institut pour le Développement Forestier (IDF), créé en 1968 et intégré au CNPF en 2006. Cet institut joue un rôle central dans la recherche appliquée et le développement scientifique visant à promouvoir une gestion durable des forêts privées. En menant des études et des expérimentations, l>IDF œuvre à renforcer les pratiques forestières tout en proposant aussi des formations spécialisées sur des sujets clés autour de la gestion forestière. Par ailleurs il édite et vend différents ouvrages sur le thème de la forêt.

En partenariat avec des institutions de recherche et d'autres acteurs du secteur forestier, le CNPF développe des outils et des méthodes innovants pour une sylviculture durable et multifonctionnelle. Il met à disposition à des propriétaires forestiers des ressources documentaires accessibles en ligne, afin de diffuser les connaissances et les pratiques les plus adaptées à chaque contexte local. Parallèlement, le CNPF s'engage dans le développement économique des territoires forestiers en valorisant les ressources forestières.

Le CNPF renforce également son dialogue avec la société civile, les élus locaux et les différents acteurs du secteur forestier grâce à ses actions de communication et de partenariat. Cela vise à accroître la visibilité de ses actions et à mobiliser les différentes parties prenantes autour de l'importance de la gestion durable des forêts privées. Avec ses 450 agents répartis dans toutes les régions, le CNPF joue un rôle central dans le développement forestier en France, visant à assurer la pérennité des ressources forestières tout en répondant aux défis environnementaux et économiques actuels (CNPF).

2. Introduction

2.1. La forêt française

Les forêts françaises couvrent 31 % du territoire métropolitain et abritent 75 % des essences présentes en Europe (ONF, 2024). Elles se répartissent entre un quart de forêts publiques et trois quarts de forêts privées, avec presque 2 milliards de mètres cubes de bois stockés dans les forêts privées (Figure 1).

Ces forêts regroupent une vaste diversité d'espèces d'arbres telles que le chêne, le hêtre et le pin. Toutefois, l'état actuel de la forêt française est impacté par le déclin de certaines espèces, en raison notamment des changements climatiques et des attaques de parasites, caractérisés par la présence d'individus dépérissant dans une forêt. Dans le but d'assurer la santé et la biodiversité de la forêt française, une gestion forestière durable s'avère indispensable (BIANCO, 1998).

La gestion forestière comprend plusieurs phases essentielles pour l'entretien et l'aménagement des forêts. Cela inclut des actions sylvicoles en faveur des meilleurs individus, la régénération naturelle ou artificielle pour renouveler le peuplement, la diversification des essences pour augmenter la biodiversité, en plus de la gestion des peuplements dépérissant et la prévention des incendies forestiers. Ces pratiques visent à concilier biodiversité, productivité, protection de l'environnement et rentabilité économique, et sont mises en œuvre par des organismes publics ou des propriétaires privés selon des plans d'aménagement forestier durable.

En France, la loi forestière de juillet 2023 impose aux propriétaires de forêts privées de plus de 20 hectares de créer un Plan Simple de Gestion (PSG). Ce document a une durée de 10 à 20 ans et comprend des directives pour une gestion durable, comme la récolte du bois, le reboisement et la préservation de la biodiversité. La détention d'un PSG en cours est requise pour obtenir l'autorisation de coupe et bénéficier d'un soutien financier de l'État. Le non-respect des règlements peut entraîner des sanctions légales.

Le CNPF, comme acteur principal pour le conseil aux propriétaires, peut réaliser des analyses de parcelles pour les aider dans leurs décisions de gestion et pour être conformer aux normes. C'est dans ce cadre que l'utilisation des drones pour des relevés forestiers plus précis peut être intéressant. Néanmoins, ce processus nécessite des compétences en télédétection, photogrammétrie et en traitement d'images pour traiter les données provenant de la collecte sur le terrain.

75 % des forêts en France sont privées

1/3 des propriétaires possèdent plus de 1 ha

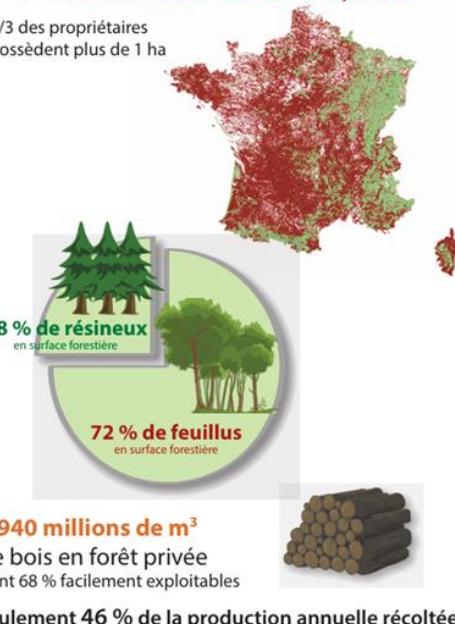


Figure 1 - Bois et forêts en France. Centre National Propriété Forestière (CNPF, 2019).

2.2. Télédétection : usage du drone en forêt

Les drones, également appelés véhicules aériens sans humain à bord (UAVs), ainsi que leurs domaines d'application, ont connu un développement rapide ces dernières années et jouent un rôle actif dans l'exploitation et la conservation forestière (Iglhaut et al., 2019 ; Kameyama & Sugiura, 2020). Les drones peuvent être équipés de différents capteurs qui collectent des données exploitables par des traitements de télédétection. Ces capteurs peuvent être de type optique passif, avec une gamme radiométrique RGB, multispectrale, voire thermique, ou des capteurs actifs de type LiDAR (Tang et Shao, 2015).

Actuellement, selon l'objectif visé, les drones présentent plusieurs avantages par rapport aux autres modes de suivi aérien (avion, hélicoptère, satellite). En effet, ils offrent un coût d'acquisition et d'utilisation plus bas, une mise en œuvre rapide, une grande adaptabilité à divers scénarios et conditions, et également une très haute résolution spatiale (Figure 2). Par exemple, dans des conditions nuageuses ou sur des terrains difficiles d'accès, les drones jouent un rôle majeur dans l'acquisition de données à haute résolution et grande précision (Anderson et al., 2013). Ces spécificités constituent un atout pour l'analyse à l'échelle d'une parcelle forestière, jusqu'à l'identification individuelle d'un arbre.

Comparativement aux images satellites ou aériennes via d'autre vecteurs, ils offrent une plus grande facilité de configuration des paramètres d'acquisition, ainsi qu'une régulation plus aisée de la résolution temporelle (Anderson et al., 2013).

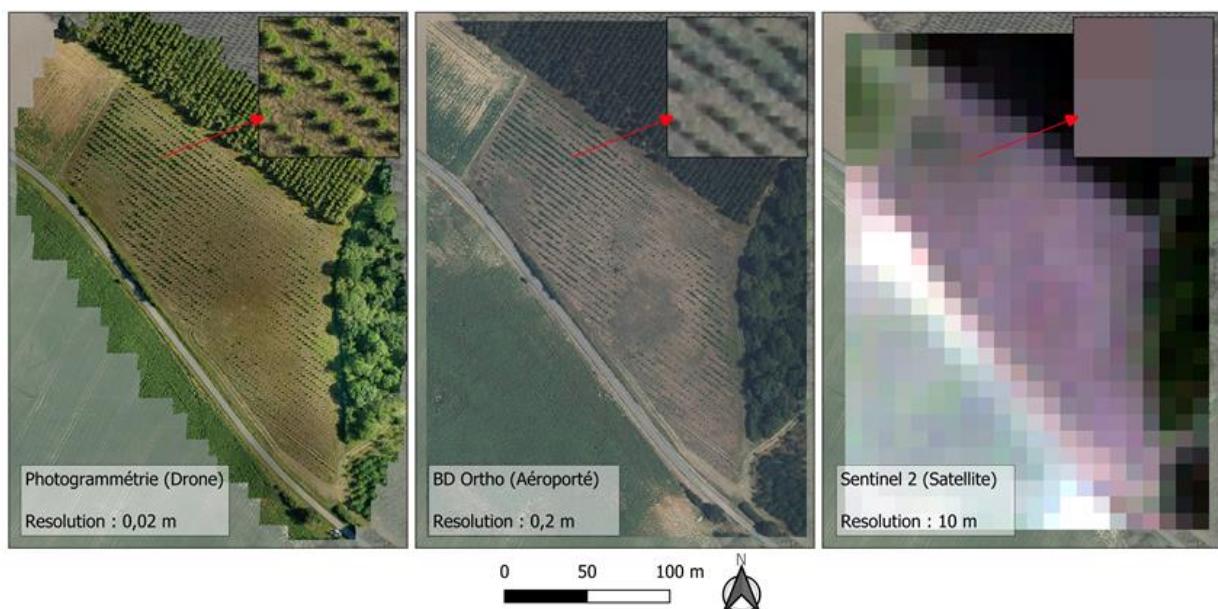


Figure 2 - Produits de télédétection : drone, avion, satellite (Auteur, 2024).

En forêt, les drones ont divers cas d'utilisation, tels que la surveillance et l'évaluation des zones forestières, le comptage des plants, la détection des dommages causés par des tempêtes/incendies, l'évaluation de l'état de santé des forêts, ainsi que la surveillance des dommages causés par l'exploitation forestière illégale, et bien d'autres encore. Ces applications contribuent à la gestion durable et à la conservation des forêts (Colomina et Molina, 2014).

2.3. Objectif de l'étude

En combinant les avantages des drones pour l'analyse forestière, les conseils aux propriétaires, les études de recherche et de développement de l'IDF, et les innovations en imagerie haute résolution, une exploration des bénéfices, des possibilités et des limites de l'utilisation des données pour l'analyse et surveillance forestière en utilisant des images Red Green Blue (RGB) collectées par drone a été effectuée.

En outre, afin que cette étude puisse être reproduite et transmissible aux ingénieurs et techniciens du CNPF, la création de tutoriels écrits, commentés et illustrés sur les méthodes de traitement et les bonnes pratiques ont été conçus (Annexe B : Tutoriels).

Ces supports sont également disponibles en ligne à l'adresse suivante : https://felipeam96.github.io/Portfolio_Felipe/projets/Stage_M2_Felipe/Stage_M2_Felipe.html.

L'exploration des différentes méthodes et outils disponibles pour les traitements et l'analyse des résultats des données drone, sera abordée en deux principales parties (Figure 3):

- 1) **Le traitement photogrammétrique** ;
- 2) **L'identification des arbres**.

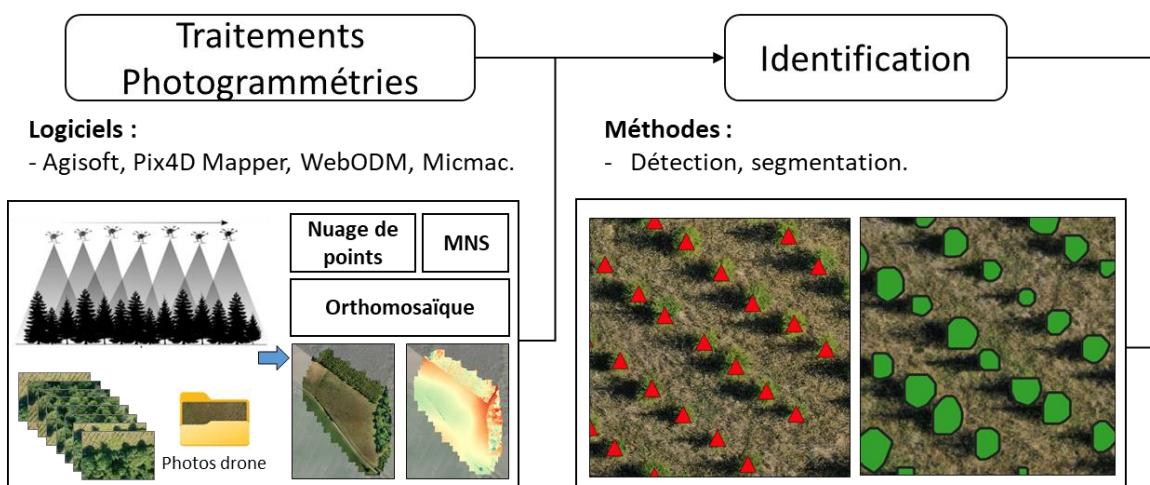


Figure 3 - Flux de travail général.

L'objectif principal de la première partie de la mission (**traitement photogrammétrique**) est de réaliser une analyse comparative des logiciels de photogrammétrie, en identifiant pour chacun des logiciels ses avantages et inconvénients, selon des critères quantitatifs et qualitatifs prédéfinies. Cette analyse sera effectuée sur des images RGB acquises par des drones (UAV) et traitées par photogrammétrie Structure from Motion (SfM), produisant des nuages de points, des modèles numériques de surface et des orthomosaïques.

Dans une deuxième partie (**identification des arbres**), l'objectif se focalise sur l'exploration des différentes méthodes d'identification individuelle des arbres, afin d'appliquer des analyses futures plus précises sur une parcelle d'étude.

2.4. Zone d'étude

Partant du principe qu'il s'agit d'une étude exploratoire visant à identifier les possibilités et les limites des méthodes, une seule zone d'étude a été choisie parmi les jeux de données disponibles au CNPF, de différentes zones aux caractéristiques variées (végétation dense, arbres adultes, essences diversifiées, état sanitaire différent, etc.). La zone de Gibel a été choisie principalement pour ses caractéristiques simples de jeune plantation (arbres d'environ 4 ans), adéquates pour une étude exploratoire.

La zone d'étude se situe en région d'Occitanie, à proximité de la commune de Gibel, dans le département de la Haute-Garonne, près des départements de l'Ariège au sud-est et de l'Aude à l'est (Figure 4).

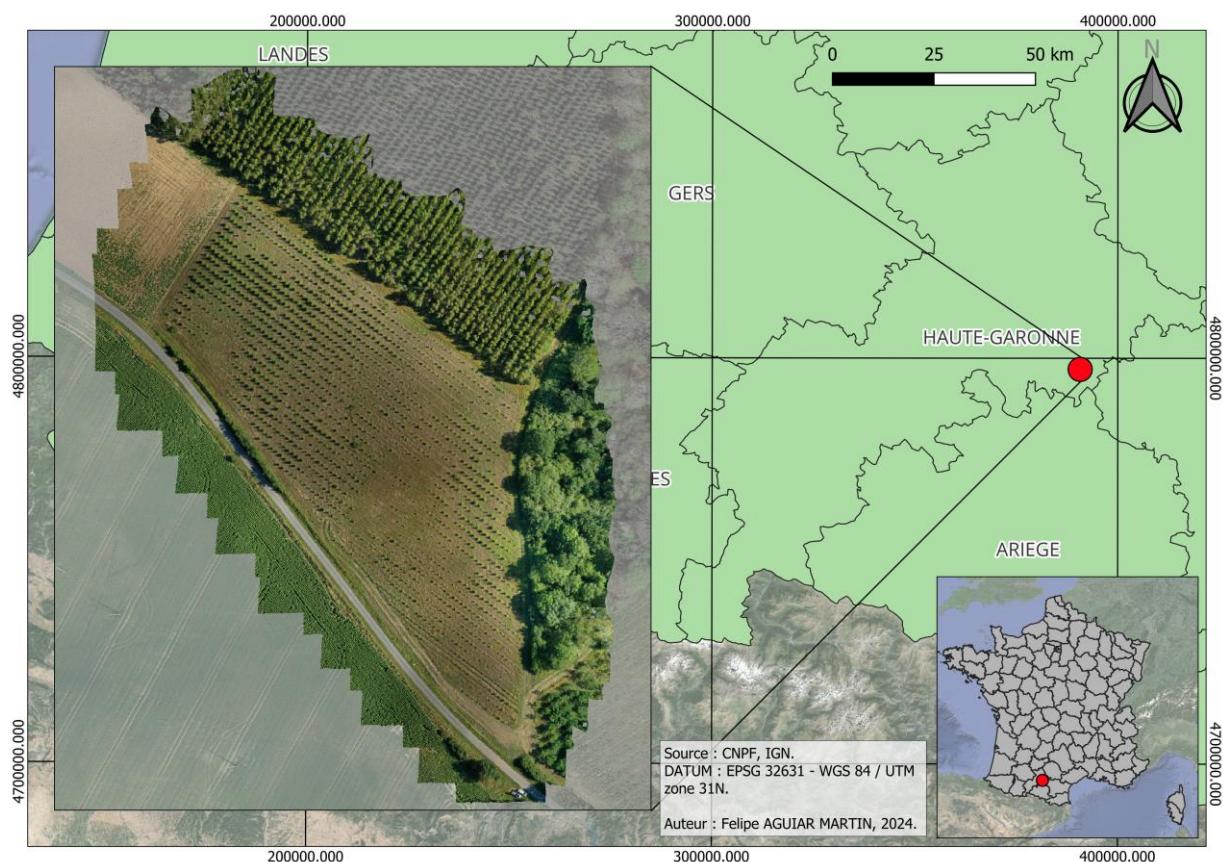


Figure 4 - Carte de localisation de la zone d'étude.

Elle se trouve à une altitude moyenne de 290 mètres et bénéficie d'un climat océanique altéré, selon la typologie des climats de la France métropolitaine. La température moyenne annuelle est assez élevée (12,5 °C), avec une amplitude thermique annuelle de 15,7 °C, et les précipitations annuelles moyennes (800-900 mm) se concentrent principalement en hiver, l'été étant assez sec (Météo France). Elle est également classée comme ZNIEFF de type 2, désignant de vastes ensembles naturels riches ou peu modifiés, offrant des potentialités biologiques importantes (INPN).

3. Photogrammétrie

3.1. Introduction à la photogrammétrie

La photogrammétrie est une méthode qui permet l'analyse et la mesure exacte d'images géo-référencées (orthophoto), résultant de la combinaison de plusieurs photos de drone se chevauchant. Elle permet d'interpréter les formes, les dimensions et la position des objets, aboutissant à une reconstruction tridimensionnelle précise (Fonstad et al., 2013).

En combinant des techniques d'imagerie et de traitement d'images, la photogrammétrie trouve des applications variées dans des domaines tels que la cartographie, l'architecture, l'archéologie, l'ingénierie civile, ou encore les sciences environnementales. Elle s'intègre dans les champs de la télédétection, caractérisée par des mesures effectuées indirectement, à partir de photographies acquises par avions, hélicoptères, satellites ou drones, mais aussi à partir d'images capturées par des caméras au sol, pour certains cas d'utilisation (Redweik, 2012).

Cette méthode comprend plusieurs étapes consécutives (Figure 5) :

1. **Alignement des photos** : c'est l'alignement des images par le positionnement géographique et l'orientation correcte de chaque photo, afin de créer une superposition correcte des images.
2. **NUAGE DE POINTS ÉPARS (tiepoints)** : les images alignées sont ensuite utilisées pour identifier des points de référence visibles sous différentes perspectives. L'algorithme détecte les points, trouve des correspondances entre les images, et calcule leurs positions dans l'espace, en reconstruisant des scènes en 3D.
3. **NUAGE DE POINTS DENSE** : le nuage de points dense est créé à partir du nuage de points épars grâce à l'identification des correspondances entre les paires d'images et à l'application d'un processus de stéréo-triangulation. Cette étape aboutit à des coordonnées tridimensionnelles pour chaque point dans la zone d'étude, comblant les lacunes et assurant une couverture complète essentielle pour créer des modèles détaillés du terrain ou des objets. Ce nuage est appelé "dense" lorsqu'il présente une haute densité de points, capturant de nombreux détails de l'objet ou du terrain.
4. **Formation du Modèle Numérique de Surface (MNS)** : le MNS est créé par la triangulation et l'interpolation des points du nuage dense. Les points sont d'abord reliés entre eux pour former des triangles couvrant toute la zone. Ensuite, à l'aide d'une méthode d'interpolation, les hauteurs de chaque point sont estimées, permettant ainsi de créer une grille de surface représentant la topographie du terrain. En fonction des besoins et des données disponibles, il est également possible de créer un Modèle Numérique de Terrain (MNT), se concentrant uniquement sur le terrain lui-même et en excluant les éléments construits ou végétaux.
5. **Formation de l'orthomosaïque** : l'orthomosaïque permet de créer une seule image rectifiée et géoréférencée en combinant de nombreuses photos superposées. Ces images rassemblées se chevauchent et subissent un processus d'égalisation radiométrique et d'orthorectification, ce qui corrige les distorsions géométriques en éliminant les effets de bord et en alignant les images pour former une vue unique depuis le nadir (point à la verticale). Elle se distingue d'une image ordinaire par la correction des distorsions causées par la perspective et le relief, ce qui donne une représentation

orthogonale précise de la zone photographiée. Cela est particulièrement utile dans les applications de cartographie qui nécessitent d'une haute précision.

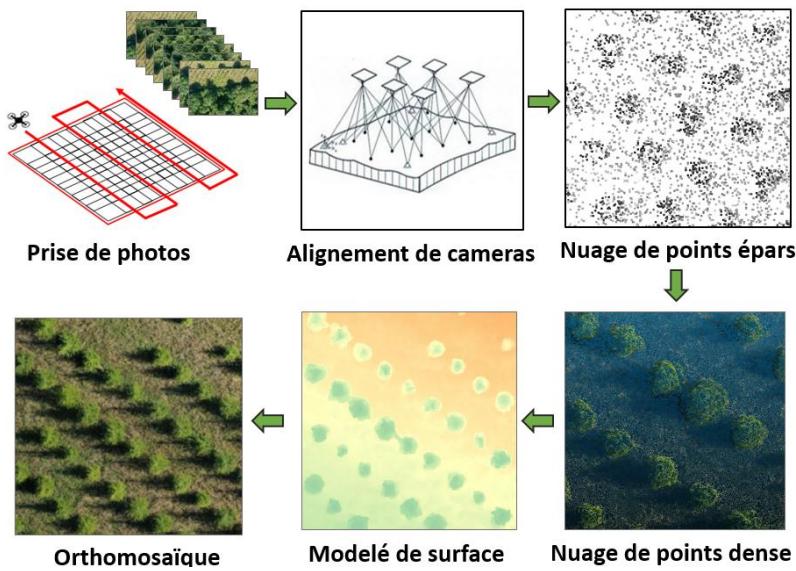


Figure 5 - Flux de traitement photogrammétrique.

3.2. Acquisition de données

Afin de garantir le succès dans la prise de données drone et leurs traitements ultérieurement, il est essentiel de définir un plan de vol et les paramètres d'acquisitions précis et de prendre en compte les contraintes de vol, surtout en milieu forestier où la végétation constitue un élément complexe et non stationnaire.

L'optimisation des paramètres de capture d'images, tels que le chevauchement des images, la hauteur de vol, l'angle de vue, la vitesse de vol, par rapport l'environnement de vol et au type de capteur sont essentiels pour obtenir une bonne résolution des résultats finaux.

Lors de l'acquisition d'images avec des objectifs grand-angle, tels que ceux présents dans la plupart des capteurs de drones commerciaux, les pixels situés près du bord de l'image subissent une distorsion angulaire de l'objet ainsi qu'une distorsion de la réflectance radiométrique. C'est pourquoi un bon chevauchement des images lors de la collecte des photos (chevauchement recommandé entre 75 et 85% en frontal et latéral), permet de corriger les images ultérieurement pour éliminer les distorsions potentielles des résultats (Assmann et al. 2018).

Selon le type d'analyse et le contexte environnemental, la période optimale d'acquisition des données peut varier. Dans les environnements maritimes, par exemple, les premières heures du jour sont idéales pour minimiser les reflets solaires et les mouvements de l'eau. En revanche, pour les environnements forestiers ou agricoles, le midi solaire est préférable, car il réduit l'ombre et la rosée matinale, améliorant ainsi l'identification de la végétation (Joyce et al. 2018; Pell et al. 2022).

Après le traitement des données, il est courant de constater l'apparition de bruits ou de lacunes avec des données notamment dans la partie marginale des résultats. Cela est dû à l'insuffisance de points de référence correspondants entre les photos situées aux marges de la zone de vol où les données ont été collectées. Pour éviter la perte de qualité des résultats dans

la zone d'intérêt, une marge de sécurité autour de la zone d'étude est recommandée, ajustée en fonction de la hauteur de vol et du pourcentage de chevauchement entre les photos.

Choisir l'altitude de vol est aussi une étape essentielle dans la planification d'une mission de drone. Une altitude inadéquate peut altérer la résolution des images et la qualité des données. De plus, la capacité du drone à suivre précisément le terrain est cruciale pour maintenir une distance constante par rapport à la surface, ce qui évite les variations de résolution en Ground Sampling Distance (GSD) au sein de l'image et prévient les collisions avec des obstacles imprévus ou le sol.

Les conditions météorologiques, telles que la pluie, le vent ou le brouillard, peuvent aussi affecter la stabilité du drone en vol et la qualité des données collectées. Il est important de prendre en compte ces facteurs et d'adapter la planification de la mission en conséquence (Pell et al. 2022).

Dans le but d'acquérir une précision géographique optimale avec les données des drones en utilisant des données géospatiales corrigées, il existe deux principales méthodes de positionnement de haute précision : le Real-Time Kinematic (RTK), qui fournit des corrections en temps réel, et le Post Processed Kinematic (PPK), qui les applique rétrospectivement après la collecte des données. Ces techniques permettent d'atteindre une précision de positionnement de l'ordre du centimètre (Tomaštík, 2019 ; Heintz et al., 2024). Cependant, en l'absence de l'application des techniques précédentes, il est également possible d'utiliser la méthode de calibration par points de contrôle au sol (GCP) pour améliorer la précision de la localisation. Cela implique de récupérer les coordonnées géographiques de cibles au sol via un relevé GNSS, pour appliquer ultérieurement la calibration géographique lors du traitement des données.

Tous ces facteurs influencent directement la qualité et la précision des orthomosaïques et des modèles numériques, ainsi que sur l'efficacité des traitements ultérieurs (Dandois, 2015 ; Dandois et al., 2020 ; Park et Lee, 2021).

3.3. Matériel et données : drone et images RGB

Pour cette étude, les données mis à disposition ont été acquises avec un drone DJI Mavic 2 Pro équipé d'un capteur RGB. Les images obtenues en juin 2022 de la parcelle de Gobel ont été enregistrées et organisées automatiquement selon une numérotation croissante, facilitant ainsi leur récupération ultérieure pour le traitement.

Au total, les 276 images (3,82 Go) ont été prises à une altitude de vol de 50 mètres et avec un chevauchement frontal et latéral des photos de 80% (Tableau 1).

Tableau 1 - Spécifications techniques et paramètres de vol (DJI).

Drone	DJI Mavic 2 Pro
Capteur	CMOS 1" - 20 mégapixels
Objectif	Champ de vision (FOV) : environ 77° Focale équivalente à 35 mm : 28 mm Ouverture : f/2,8-f/11 Obturateur électronique : 8–1/8 000 s
Taux de chevauchement	Frontal 80% - Latéral 80%
Altitude de vols	50 m

Par rapport aux paramètres d'acquisitions optimales mentionnées dans la section précédente sur l'acquisition de données, les données utilisées dans cette étude sont suffisamment bonnes pour un traitement photogrammétrique. Cela est principalement dû aux bonnes conditions de collecte et au drone utilisé, notamment une hauteur de vol modérée (50 m), un taux de chevauchement élevé (80 %), une marge de sécurité (20 m) et une bonne résolution des images (20 mégapixels). Le vol drone a également été effectué dans de bonnes conditions climatiques et proches du midi solaire.

Néanmoins, concernant la précision géographique, elle a été estimée insuffisante en raison de l'absence d'équipements RTK ou GCP pour un géoréférencement plus précis. Seul le positionnement des référencements GPS des photos a permis leur recalage géographique dans les traitements.

3.4. Présentation des logiciels et méthode mise en place pour la comparaison

3.4.1. Logiciels

Il existe de nombreux logiciels de photogrammétrie disponibles pour le traitement de photos terrestres ou aériennes (Barban et al., 2019 ; Aati et al., 2020 ; Jouin, 2020 ; Kameyama & Sugiura, 2021 ; Jarahizadeh & Salehi, 2024). Dans le cadre de cette étude, quatre des logiciels les plus couramment cités pour ce type d'analyse en milieu professionnel ont été sélectionnés : **Agisoft Metashape**, **Pix4D Mapper**, **WebODM** et **Micmac** (version GUI CEREMA "AperoDeDenis") (Tableau 2).

Tableau 2 - Tableau des logiciels.

Logiciels	Propriétés	Logos
Agisoft Metashape	Agisoft LLC - Saint-Pétersbourg - Russie	
Pix4D Mapper	Pix4D SA - Suisse	
WebODM	Communauté OpenDroneMap	
Micmac	IGN (Institut Géographique National) et ENSG (École Nationale des Sciences Géographiques)	

Agisoft Metashape : Ce logiciel commercial de photogrammétrie est très puissant et largement utilisé dans le domaine professionnel de la télédétection (Over et al., 2021 ; Tinkham & Swayze, 2021). Anciennement Agisoft PhotoScan, ce logiciel est développé par Agisoft LLC, société russe basée à Saint-Pétersbourg fondée en 2006 et spécialisée dans le développement d'algorithmes de traitement d'images après des années de recherche et développement.

Il offre des fonctionnalités avancées pour le traitement d'images aériennes et terrestres, la création de modèles 3D et la génération d'orthomosaïques. Metashape est reconnu pour sa

précision et sa robustesse. Il est compatible avec les systèmes d'exploitation Microsoft Windows, MacOS et Linux.

La version utilisée lors de cette étude est la suivante : Agisoft Metashape v. 1.8.5.

Pix4D Mapper : ce logiciel est développé par Pix4D, une entreprise suisse fondée en 2011 en tant que spin-off du Laboratoire de Vision par Ordinateur de l'École Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL) en Suisse.

Similaire à Metashape, il permet de transformer des images aériennes en modèles 3D et cartes détaillées (Barbasiewicz et al., 2018 ; Fraser & Congalton, 2018). En tant que société spécialisée dans la photogrammétrie, Pix4D propose une gamme de solutions logicielles pour diverses applications, de la cartographie à l'agriculture de précision. Grâce à son interface conviviale, Pix4D Mapper est largement utilisé par des professionnels et des novices pour réaliser des projets de cartographie et de modélisation en 3D avec précision et facilité.

La version utilisée lors de cette étude est la suivante : Pix4D Mapper v. 4.9.0.

WebODM : WebODM est une solution open source et gratuite pour la photogrammétrie pour créer des cartes et des modèles 3D à partir d'images aériennes (Vacca, 2020 ; Patel et al., 2024). Il est largement utilisé par la communauté pour ses fonctionnalités de traitement d'images aériennes et la création d'orthomosaïques, de nuages de points et de modèles 3D. Il est disponible sur GitHub en tant que projet open source. Il peut être contrôlé via des lignes de commande ou par une interface graphique web appelée WebODM. Pour leur usage en version gratuite, il est utilisé via Docker (une interface graphique simulatrice Linux et qui utilise également Windows Subsystem for Linux - WSL 2).

L'outil utilise des bibliothèques comme OpenSfM pour détecter et assortir des caractéristiques, et OpenMVS pour générer un nuage de points dense à partir duquel des maillages sont créés. Il peut également traiter des vidéos aériennes en les convertissant en images fixes. Il peut utiliser des GPU (Graphics processing unit, ou usuellement appelé plaque graphique) et prend en charge le calcul parallèle de CUDA (Compute Unified Device Architecture - traitement des calculs en parallèle, accélérant ainsi le traitement). Pour les gros volumes de données, il est recommandé d'avoir minimum aux 20 cœurs de processeur et 128 Go de mémoire.

Bien qu'il puisse être moins sophistiqué que les autres logiciels payants en termes de fonctionnalités avancées, WebODM est apprécié par les scientifiques et les professionnels de la télédétection pour son accessibilité et sa communauté de support active.

La version utilisée lors de cette étude est la suivante : WebODM v. 3.4.0.

MicMac : il s'agit d'une solution de photogrammétrie en open source développée par l'IGN en France, offrant des fonctionnalités telles que la reconstruction 3D, la création d'orthomosaïques et de nuages de points. MicMac est principalement utilisé dans les milieux académiques et de recherche, bénéficiant d'un soutien actif de la communauté (Rupnik et al., 2017 ; Jaud et al., 2018).

Ce logiciel a initialement été développé pour le traitement de données topographiques provenant d'agents de terrain de l'IGN, plutôt que pour les données directement de drones. Toutefois, depuis 2015, des dernières versions plus récentes sont aptes à travailler dans le

domaine de la reconstitution 3D. Sa version actuelle est en plein développement et une version Micmac v.2, promettant d'être plus performante, est en cours de création.

La version utilisée lors de cette étude est la suivante : Micmac AperoDeDenis V 5.78.

3.4.2. Méthode

Chaque logiciel propose ses propres flux de travail recommandés par le développeur, ainsi qu'une variété de paramètres pouvant être ajustés manuellement selon les besoins de l'utilisateur. Cependant, les paramétrés de niveau standard sont privilégiés ici afin de standardiser et d'éviter les divergences de traitements entre les logiciels.

Les traitements ultérieurs pourront se baser sur ces résultats, considérés comme étant de bonne qualité et cohérents. Cette approche permettra également d'accélérer le traitement des données à toutes les étapes.

Avec de légères variations de terminologie entre les logiciels, chacun suit un flux de travail similaire :

- Chargement des données ;
- Alignement des photos ;
- Création d'un nuage de points épars (tiepoints);
- Création d'un nuage de points dense ;
- Création d'un MNS (et si possible MNT) ;
- Construction d'une orthomosaïque.

Nommé différemment entre chaque logiciel, mais contenant ces mêmes étapes, le flux de travail "3D Maps - Standard" de Pix4D Mapper, et le modèle par défaut pour WebODM ont été utilisés. Comme Agisoft Metashape n'a pas de flux de travail automatisé prédéfini, les composants recommandés par le fabricant ont été sélectionnés, à savoir l'alignement des photos, l'optimisation de l'alignement, la construction d'un nuage dense, la création d'un MNS et la génération d'une orthomosaïque, tous à niveau moyen. De même que pour Micmac AperoDeDenis, qui propose une automatisation mais pas le flux de travail prédéfini, le traitement standard moyen a été utilisé pour les jeux de données.

De plus, à des fins de comparaison avec une source de données de référence fiable et bien connue, les données de l'Institut national de l'information géographique et forestière (IGN) ont été utilisées, comprennent à la fois les données altimétriques provenant des relevés aériens LiDAR HD IGN, ainsi que les données planimétriques issues de la BD Ortho IGN (Figure 6).

Les données IGN bénéficient d'une résolution centimétrique garantie par des contrôles terrain (IGN, 2023). Pour les données LiDAR HD (IGN), un contrôle géométrique est effectué à l'aide de points de contrôle afin de garantir une précision minimale de 50 cm en horizontal, et de 10 cm en vertical. Pour la base de données orthophotographiques, la précision horizontale est d'environ 15 cm, pouvant également être validée par des données LiDAR (IGN, 2023).

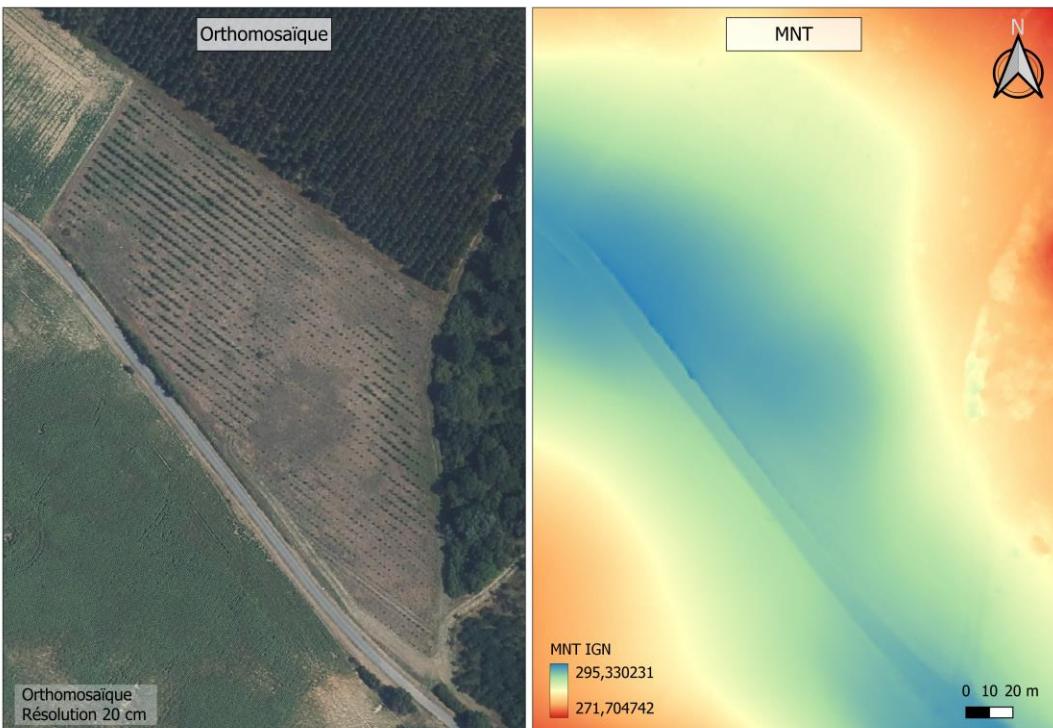


Figure 6 - Carte des données IGN de référence altimétrique et planimétrique.

En plus de la standardisation, la comparaison entre les logiciels est réalisée à partir de deux groupes de critères :

- les critères **quantitatifs** ;
- les critères **qualitatifs**.

Les données à comparer sont les résultats des produits générés par les quatre logiciels, ainsi que les constatations faites lors de l'utilisation de chaque outil pendant le processus de traitement.

- **Critères quantitatifs :**

Nuage de points dense

C'est la quantité de points dense et leur densité de points par mètre carré.

Il n'y a pas de quantité spécifique de points considérée comme optimale, car cela peut varier selon chaque scénario et la surface captée. Cependant, dans le cadre du comparatif, il est considéré comme préférable de disposer d'une plus grande résolution et plus grande quantité de points denses.

La quantité totale de points est obtenue à partir du rapport généré par chaque logiciel, tandis que la densité par mètre carré est calculée avec le plug-in Lastools (lasinfo) sur QGIS.

Résolution orthomosaïque

C'est la résolution spatiale de l'orthomosaïque résultant. Il n'existe pas non plus de résolution spatiale optimale, car cela peut aussi varier en fonction du scénario et du type d'analyse. Cependant, dans le cadre du comparatif et au vue de la résolution des images

aériennes d'origine, il est considéré comme préférable de disposer d'une résolution spatiale inférieure ou égale à 3 cm.

Résolution MNS

C'est la résolution spatiale du Modèle Numérique de Surface résultant. Dans le même cadre du comparatif et se basant sur une résolution optimal de l'orthophoto, une résolution minimale de 3 cm a été aussi considérée.

Précision planimétrique

La précision planimétrique est le niveau de précision géographique dans les mesures de position horizontale (X et Y).

En raison de l'absence de points de contrôle au sol (GCP), il n'a pas été possible de réaliser des évaluations traditionnelles de précision horizontale. À la place, le jeu de données de référence de l'IGN BD Ortho, avec une résolution spatiale de 20 centimètres déjà calibrée géographiquement et vérifiée avec une bonne précision a été utilisé (IGN, 2023). Pour cela, des ensembles de 10 points identifiables ont été créés pour évaluer l'aspect planimétrique à travers chacune des quatre orthomosaïques (Figure 7).

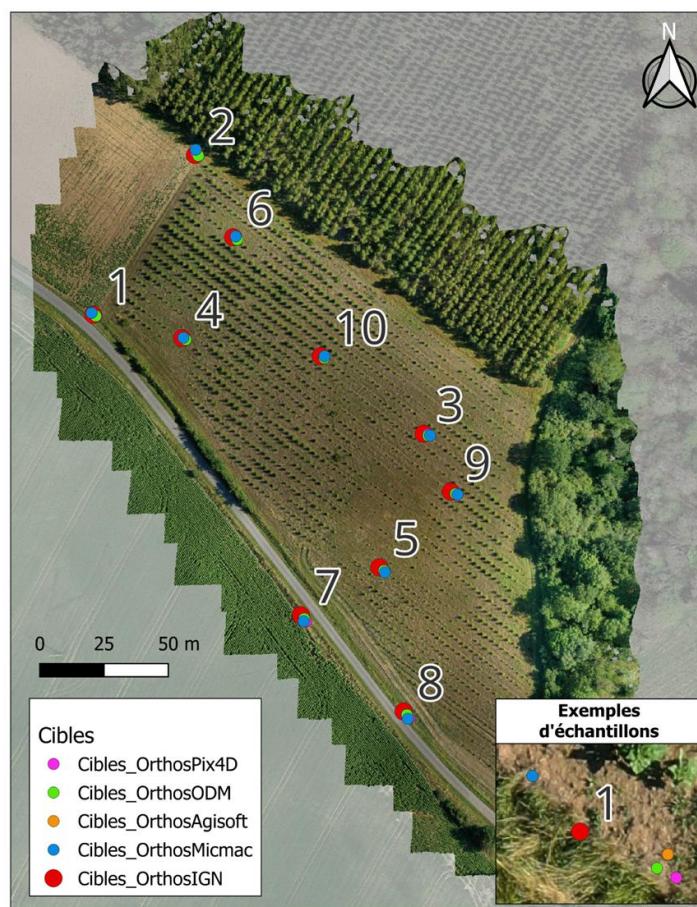


Figure 7 - Carte des échantillons pour le calcul de la précision planimétrique.

En calculant la distance entre la cible et la référence BD Ortho IGN sur l'axe horizontal, la distance la plus petite est considérée comme préférable. Il en est de même pour la valeur de l'erreur moyenne quadratique (RMSE).

Précision altimétrique

La précision altimétrique est le niveau de précision géographique dans les mesures de position verticale (Z).

En raison également de l'absence des mêmes GCP, le jeu de données de référence de l'IGN LiDAR HD classifié de densité de 35,58 points/m² transformé en MNT de 50 centimètres de résolution a été utilisé pour les mesures comparatives.

Indépendamment à l'analyse comparative planimétrique, 10 autres points au sol éloignés des obstacles et présentant des caractéristiques altimétriques différentes ont été créés et utilisés pour calculer le décalage altimétrique résultant après le traitement avec différents logiciels (Figure 8).

En calculant la distance entre la cible et la référence BD Ortho IGN sur l'axe verticale, la distance la plus petite est considérée comme préférable. Il en est de même pour la valeur de l'erreur moyenne quadratique (RMSE).

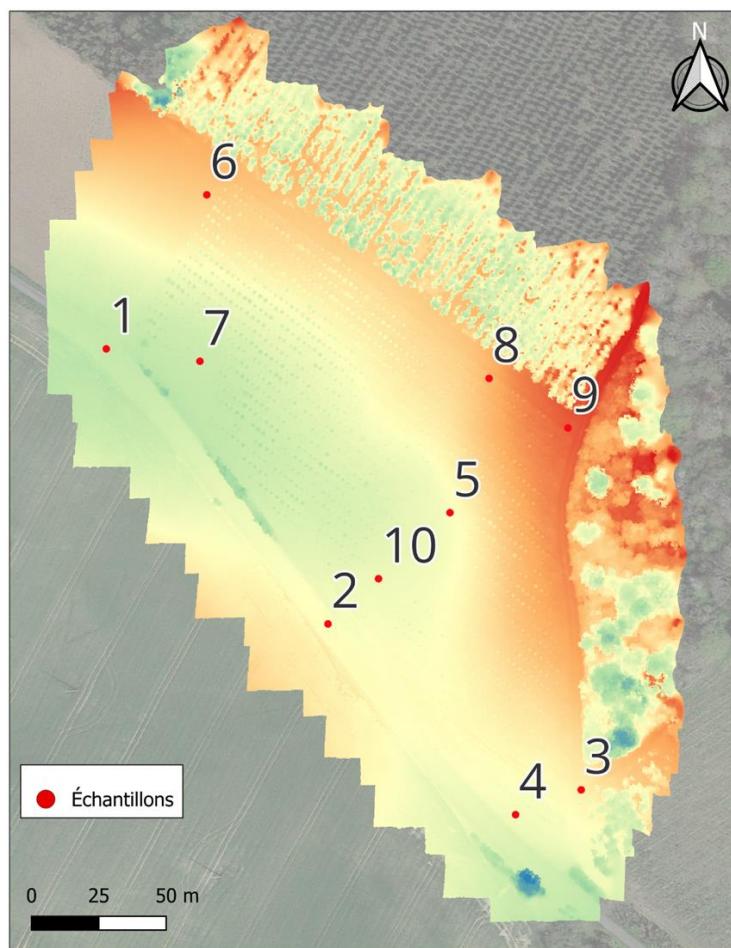


Figure 8 - Carte des échantillons pour le calcul de la précision altimétrique.

Temps de traitement

C'est le temps nécessaire pour la réalisation de toutes les étapes du traitement photogrammétrique. Ce temps est directement lié à la performance du logiciel dans l'application des traitements des données. Ainsi, plus le temps de traitement est rapide, plus le logiciel est jugé comme performant.

- **Critères qualitatifs :**

Certains de ces critères peuvent être considérés comme arbitraires, car ils sont basés sur un jugement personnel et celui d'autres testeurs.

Langues disponibles

Ce critère vise uniquement à signaler la possibilité d'utilisation du logiciel en plusieurs langues - français, en anglais et autres, étant donné que l'étude est destinée au public français.

Facilité d'utilisation

C'est le niveau de facilité et d'intuition pour l'utilisation du logiciel. (ref. : ★★★★★)

Facilité d'installation

C'est le niveau de facilité et d'intuition pour l'installation du logiciel. (ref. : ★★★★★)

Possibilité de personnalisation des traitements

Ce critère est lié à l'existence de possibilités de personnalisation des processus de traitement des données dans les logiciels. (ref. : ★★★★★)

Artefacts

Toutes les sorties des orthomosaïques sont examinées visuellement pour identifier les distorsions évidentes et les artefacts sur la carte, assurant ainsi une évaluation complète du milieu et des bordures des ensembles de images. Le résultat est considéré comme mauvais s'il y a des artefacts ou des données manquantes pour l'aire au-delà des bords. (ref. : ★★★★★)

Coût

Il s'agit du coût acquisition d'un logiciel. (ref. : Payant ou Gratuit)

3.5. Comparaison des logiciels de photogrammétrie et résultats obtenus

En partant de la méthode de standardisation et des critères quantitatifs et qualitatifs appliqués sur le même jeu de données d'entrée présenté précédemment, tous les logiciels ont produit les résultats attendus, à savoir : un **nuage de points dense**, un **modèle numérique de surface** (MNS) et une **orthomosaïque** (**Figure 9**). Cependant, quelques différences remarquables ont été observées et analysées (Tableau 3) et seront présentées et commentées dans cette section.

En plus, pour faciliter la visualisation des résultats, un WebMapping de comparaison des orthomosaïques et MNS et a été créé : https://felipeam96.github.io/Photogrammetrie_CNPF/

Tableau 3 - Tableau comparatif des résultats entre logiciel.

Critères	Agisoft Metashape	Pix4D Mapper	WebODM	Micmac
Critères quantitatifs				
Nuage de points dense	592,83 points/m ² - 29 888 063 points	788,07 points/m ² - 36 995 095 points	734,90 points/m ² - 36 794 742 points	1503,24 points/m ² - 80 646 027 points
Résolution orthomosaïque	1,2 cm	1,3 cm	5 cm	1,2 cm
Résolution MNS	5 cm	1,3 cm	5 cm	15 cm
Précision planimétrique moyenne	1,72 m	1,93 m	1,71 m	2,02 m
Précision altimétrique moyenne	0,98 m	-1,74 m	2,88 m	5,56 m
Temps de traitement	25m 28s	3h 56m 55s	1h 25m 57s	5h 16m 40s
Critères qualitatifs				
Langues disponibles	Français, anglais et autres			
Facilité d'utilisation	★★★★★	★★★★★	★★★★★★	★
Facilité d'installation	★★★★★	★★★★★	★★	★★
Personnalisation des traitements	★★★★★★	★★★★★★	★★★★★	★★★★
Présence de bruit	★★★★★★	★★★★★★	★★★★★★	★★★★★★
Coût	Payant (3 270€)	Payant (€4 690)	Payant (Windows \$64)	Gratuit (Linux) / Gratuit

Informations techniques sur l'équipement utilisé

Les résultats ont été visualisés et analysées comparativement en utilisant le logiciel de Système d'Information Géographique libre d'accès QGIS v.3.32.3, avec quelques manipulations réalisées également par interface Python v.3.12.4. Un ordinateur portable a été utilisé, dont les spécificités techniques sont indiquées sur le Tableau 4 :

Tableau 4 - Informations techniques de l'équipement.

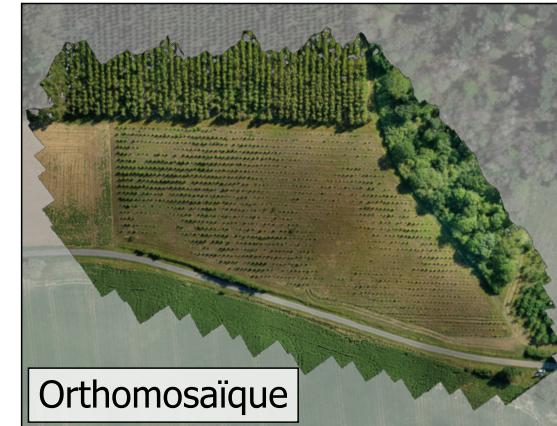
Informations du système	
OS	Windows 11, 64-bit
RAM	16GB
CPU	11th Gen Intel(R) Core (TM) i7-11800H @ 2.30GHz
GPU	NVIDIA GeForce RTX 3060 Laptop GPU (Driver: 31.0.15.5176)

Agisoft Metashape

Pix4D Mapper

WebODM

Micmac



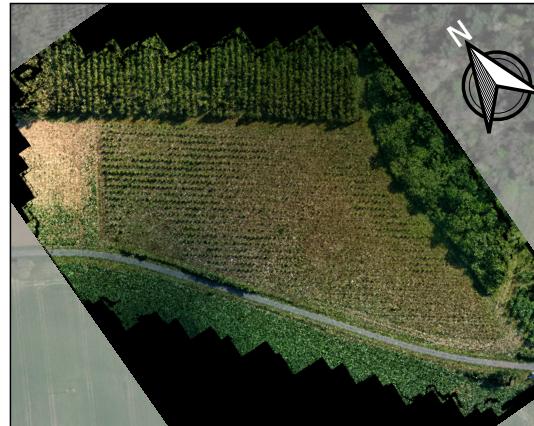
Orthomosaïque



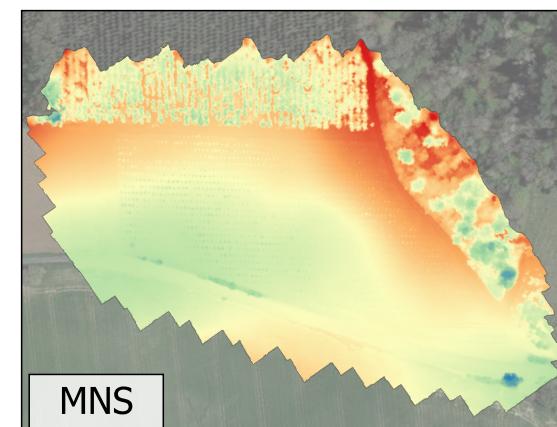
Pix4D Mapper



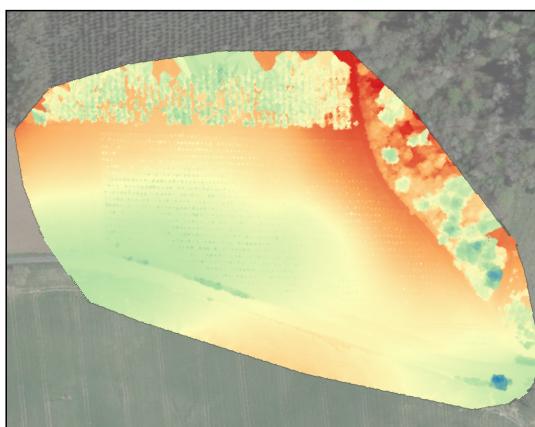
WebODM



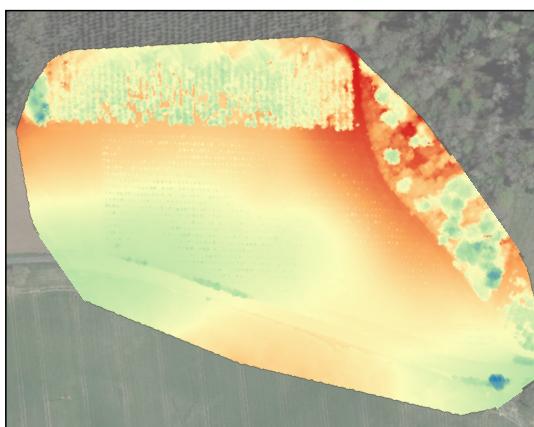
Micmac



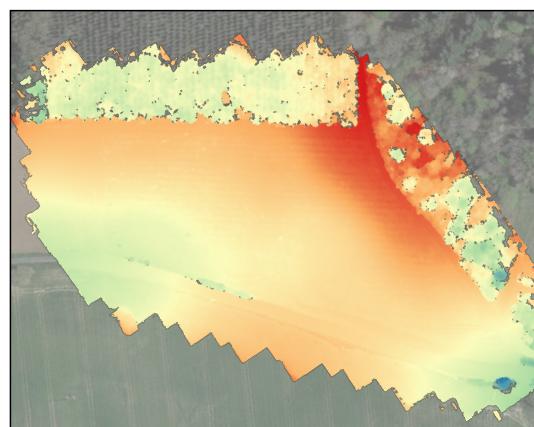
MNS



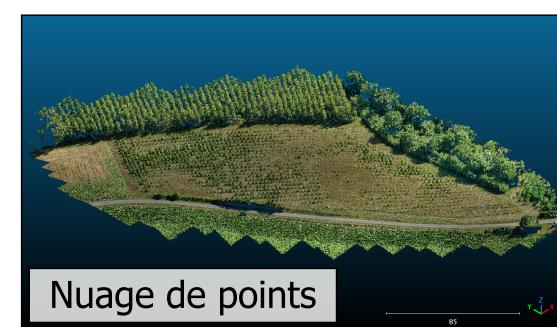
Pix4D Mapper



WebODM



Micmac



Nuage de points



Pix4D Mapper



WebODM



Micmac

Résolution orthomosaïque : 1,2 cm
Résolution MNS : 5 cm
Nuage de points : 29 888 063 points
Résolution : 592,83 points/m³
Precision alti. : 1,72 m
Precision Planim. : 0,98

Résolution orthomosaïque : 1,3 cm
Résolution MNS : 1,3 cm
Nuage de points : 36 995 095 points
Résolution : 788,07 points/m³
Precision alti. : 1,93 m
Precision Planim. : -1,74 m

Résolution orthomosaïque : 5 cm
Résolution MNS : 5 cm
Nuage de points : 36 794 742 points
Résolution : 734,90 points/m³
Precision alti. : 1,71 m
Precision Planim. : 2,88 m

Résolution orthomosaïque : 1,2 cm
Résolution MNS : 15 cm
Nuage de points : 80 646 027 points
Résolution : 1503,24 points/m³
Precision alti. : 2,02 m
Precision Planim. : 5,56 m

3.5.1. Critères Quantitatifs

Nuage de points dense

En ce qui concerne la résolution du nuage de points, tous les résultats ont présenté une densité de points par mètre carré considérée comme de très bonne qualité, atteignant en moyenne 904,76 points/m² (Tableau 5). Les différences sont les plus marquées entre le logiciel Agisoft Metashape, avec une résolution inférieure de 34% à la moyenne, et Micmac, avec une résolution supérieure de 66% à la moyenne.

Tableau 5 - Résultats des nuages de points dense.

Critères	Agisoft Metashape	Pix4D Mapper	WebODM	Micmac
Nuage de points dense	592,83 points/m ² - 29 888 063 points	788,07 points/m ² - 36 995 095 points	734,90 points/m ² - 36 794 742 points	1503,24 points/m ² - 80 646 027 points
				
35,58 points/m ²	592,83 points/m ² 29 888 063 points	788,07 points/m ² 36 995 095 points	734,90 points/m ² 36 794 742 points	1503,24 points/m ² 80 646 027 points

Pour la quantité totale de points, une moyenne de 39 355 982 points a été observée ; Agisoft étant inférieur de 24% à la moyenne, tandis que Micmac est supérieur de 104%.

Les différences proviennent principalement des méthodes de traitement spécifiques à chaque logiciel, ainsi que des variations de la zone de recouvrement prise en compte. Avec une moyenne de zone de recouvrement de 50 269 m², Micmac a couvert une zone supérieure de 6 % par rapport à la moyenne (zone de recouvrement : Agisoft Metashape : 50 416 m², Pix4D Mapper : 46 944 m², WebODM : 50 068 m², Micmac : 53 648 m²).

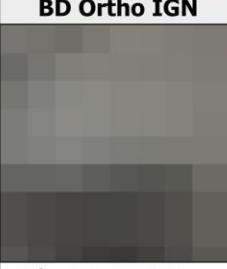
En examinant les produits finaux, certains logiciels comme Pix4D Mapper et WebODM montrent un meilleur recouvrement des caractéristiques verticales, tandis que d'autres, comme Micmac, se concentrent sur les caractéristiques horizontales. Agisoft maintient un recouvrement uniforme entre les deux.

En résumé, **Micmac** a obtenu la meilleure résolution avec 1503,24 points/m², mais présente des problèmes d'aplatissement, suivi de Pix4D Mapper avec 788,07 points/m², WebODM avec 734,90 points/m², et enfin Agisoft Metashape avec 592,83 points/m² (Tableau 5).

Résolution orthomosaïque

Tous les logiciels ont réussi à produire des produits d'image de grande qualité. Agisoft, Pix4D et Micmac ont atteint une résolution fine comprise entre 1,2 et 1,3 centimètre. En revanche, WebODM a généré une orthomosaïque avec une résolution de 5 centimètres (Tableau 6).

Tableau 6 - Résultats des orthomosaïques.

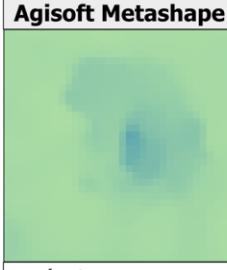
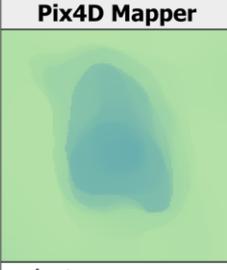
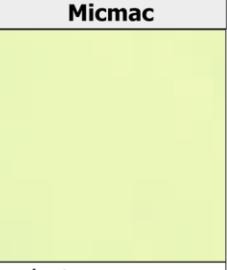
Critères	Agisoft Metashape	Pix4D Mapper	WebODM	Micmac
Résolution orthomosaïque	1,2 cm	1,3 cm	5 cm	1,2 cm
BD Ortho IGN	Agisoft Metashape	Pix4D Mapper	WebODM	Micmac
				
Résolution : 20 cm	Résolution : 1,2 cm	Résolution : 1,3 cm	Résolution : 5 cm	Résolution : 1,2 cm

Un autre point crucial à prendre en compte, en lien direct avec la haute qualité de ces données, est la variation significative de la taille des fichiers générés (tous en 8 bits). Cela porte une grande importance lorsqu'il s'agit de partager des données entre collaborateurs ou de les héberger sur des serveurs (Agisoft Metashape : 1,730 Go, Pix4D Mapper : 0,827 Go, WebODM : 0,072 Go, Micmac : 1,587 Go).

Résolution MNS

Concernant les résultats des modèles numériques de surface, **Pix4D** a atteint une résolution de 1,3 centimètre, équivalente à celle de l'orthomosaïque. En revanche, Agisoft et WebODM ont obtenu un MNS de 5 centimètres. Enfin, Micmac a obtenu une résolution bien inférieure, de 15 centimètres (Tableau 7).

Tableau 7 - Résultats des Modèle Numériques de Surface.

Critères	Agisoft Metashape	Pix4D Mapper	WebODM	Micmac
Résolution MNS	5 cm	1,3 cm	5 cm	15 cm
MNT LiDAR HD IGN	Agisoft Metashape	Pix4D Mapper	WebODM	Micmac
				
Résolution : 50 cm	Résolution : 5 cm	Résolution : 1,3 cm	Résolution : 5 cm	Résolution : 15 cm

Comme mentionné avec la résolution de l'orthomosaïque, la question du rapport coût-bénéfice se pose en ce qui concerne la qualité et la taille des données (tous en 32 bits ; Agisoft Metashape : 0,082 Go, Pix4D Mapper : 0,435 Go, WebODM : 0,047 Go, Micmac : 0,029 Go).

Précision planimétrique

Sans avoir réalisé de vol utilisant des techniques de haute précision géographique comme le RTK, le PPK, ou encore l'utilisation de Points de Contrôle au Sol (GCP), les échantillons ont montré, par rapport à la référence IGN, une différence moyenne comprise entre

1,71 et 2,02 mètres, sans uniformité notable sur l'ensemble des échantillons de la zone survolée (Tableau 8).

Tableau 8 - Résultats des précisions planimétriques.

Critères	Agisoft Metashape	Pix4D Mapper	WebODM	Micmac
Précision planimétrique moyenne	1,72 m	1,93 m	1,71 m	2,02 m

Les logiciels **Agisoft** et **WebODM** ont obtenu les moyennes de distance euclidienne les plus basses par rapport à la référence IGN, ainsi que les valeurs d'erreur quadratique moyenne les plus faibles, tandis que Micmac et Pix4D Mapper ont montré les moyennes les plus élevées (Tableau 9).

Tableau 9 - Tableau et échantillons de comparaison de la précision planimétrique.

Précision Planimétrique (m)					
id	IGN	Agisoft	Pix4D	ODM	Micmac
Dist. Euclid. 1		1,16	1,37	1,09	0,94
Dist. Euclid. 2		1,36	0,85	1,30	2,07
Dist. Euclid. 3		1,99	1,73	1,98	2,63
Dist. Euclid. 4		1,46	1,58	1,48	0,46
Dist. Euclid. 5		2,10	2,67	2,14	2,84
Dist. Euclid. 6		1,85	1,32	1,81	1,05
Dist. Euclid. 7		1,84	3,08	1,89	2,60
Dist. Euclid. 8		1,79	3,43	1,84	3,31
Dist. Euclid. 9		1,97	2,00	2,03	2,88
Dist. Euclid. 10		1,64	1,28	1,55	1,45
RMSE		5,72	6,43	5,70	6,74
Moyenne		1,72	1,93	1,71	2,02
Écart-type (ET)		0,32	0,87	0,36	1,02
Outliers ($\pm 2 \times ET$)		1,07	0,18	0,99	-0,01
		2,36	3,68	2,43	4,06

RMSE = Erreur quadratique moyenne; Le RMSE peut être utilisé pour comparer la performance de différents modèles et choisir celui qui présente l'erreur la plus faible. Formule : $RMSE = \sqrt{((1/N) * \sum (y - \hat{y})^2)}$; **Diff moyenne** = Il n'y a pas de différence de moyenne car c'est déjà une valeur de distance calculée par rapport la référence ; Outliers = Valeurs supérieures ou inférieures à 2 écarts-types. Formule : $\mu - 2 \times \text{écart-type}$; **Distance Longitude** = Distance sur l'axe longitudinal entre les points d'échantillonnage par rapport à la référence IGN. Formule : $\Delta X_{\text{Logiciel A}} = \text{Logiciel A Long}_X - \text{Référence IGN Long}_X$; **Distance Latitude** = Distance sur l'axe latitudinal entre les points d'échantillonnage par rapport à la référence IGN. Formule : $\Delta Y_{\text{Logiciel A}} = \text{Logiciel A Lat}_Y - \text{Référence IGN Lat}_Y$; **Dist. Euclid.** Distance euclidienne entre les points d'échantillonnage par rapport à la référence IGN. Formule : $D_{\text{Logiciel A}} = \sqrt{(\Delta X_{\text{Logiciel A}}^2 + \Delta Y_{\text{Logiciel A}}^2)}$.

Lorsque l'on examine la distribution des valeurs des écarts-types, on remarque que Micmac et Pix4D présentent les valeurs les plus élevées, ce qui indique une plus grande variabilité dans les distances euclidiennes. De plus, une analyse visuelle des résultats révèle une distorsion géographique non uniforme sur l'ensemble de l'image résultante par rapport à la référence. En revanche, Agisoft et WebODM montrent une déviation plus homogène (Figure 10).

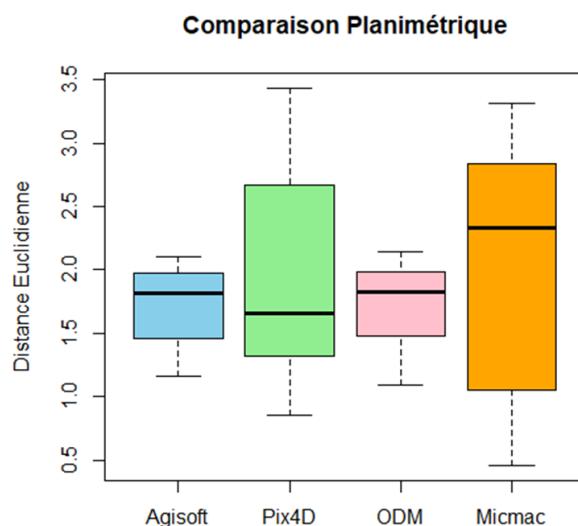


Figure 10 - Box-plot des distances des échantillons par rapport à la référence IGN.

Précision altimétrique

La comparaison altimétrique, réalisée dans des conditions similaires d'absence d'équipements de haute précision géographiques ni de GCP, montre des différences moyennes d'altimétrie entre -1,74 et 5,56 mètres par rapport à la référence IGN.

Agisoft présente la plus faible moyenne d'écart de 0,98 mètres et un RMSE de 3,27, indiquant la meilleure précision altimétrique. Ensuite, Pix4D a montré des écarts altimétriques négatifs avec une moyenne et un RMSE inférieurs à ODM, tandis que Micmac a montré des valeurs beaucoup plus élevées et un écart-type deux fois supérieur au précédent (Tableau 10).

Tableau 10 - Résultats des précisions altimétriques.

Critères	Agisoft Metashape	Pix4D Mapper	WebODM	Micmac
Précision altimétrique moyenne	0,98 m	-1,74 m	2,88 m	5,56 m

Les valeurs pour tous les échantillons des différents logiciels se situent dans une plage normale, sans valeurs aberrantes/outliers (Tableau 11).

Tableau 11 - Tableau des échantillons de comparaison de la précision altimétrique.

Précision Altimétrique (m)					
id	IGN	Agisoft	Pix4D	ODM	Micmac
Haut. Altim. 1		1,22	-1,04	2,90	5,98
Haut. Altim. 2		0,37	-2,55	2,20	3,80
Haut. Altim. 3		0,80	-2,07	2,68	7,04
Haut. Altim. 4		0,68	-2,30	2,45	6,48
Haut. Altim. 5		0,88	-1,97	2,71	4,10
Haut. Altim. 6		1,62	-0,63	3,75	7,94
Haut. Altim. 7		1,03	-1,38	2,75	4,83
Haut. Altim. 8		1,56	-1,42	3,62	5,75
Haut. Altim. 9		1,04	-1,82	3,32	5,99
Haut. Altim. 10		0,61	-2,22	2,39	3,72

Réf.
IGN

RMSE	3,27	5,80	9,59	18,54
Moyenne	0,98	-1,74	2,88	5,56
Écart-type (ET)	0,40	0,61	0,52	1,42
Outliers ($\pm 2 \times ET$)	0,18	-2,95	1,83	2,71
	1,78	-0,53	3,93	8,41

RMSE = Erreur quadratique moyenne; Le RMSE peut être utilisé pour comparer la performance de différents modèles et choisir celui qui présente l'erreur la plus faible. Formule : $RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum (y - \hat{y})^2}$; **Moyenne** = Moyenne des valeurs des échantillons. Formule : $\mu = \frac{1}{n} \sum H_{altim}$; **Outliers** = Valeurs supérieures ou inférieures à 2 écarts-types. Formule : $\mu - 2 \times ET$; **Haut. Altim.** = Hauteur altimétrique entre les points d'échantillonage par rapport à la référence IGN. Formule : $Haut. Altim. = Haut. Logiciel A - Haut. Ref (IGN)$.

En comparant les résultats des différences des hauteurs altimétriques des échantillons, on observe que tous les logiciels ont indiqué une différence totale homogène, sauf Micmac, puisqu'ils ont eu une faible dispersion des hauteurs. Agisoft, Pix4D et WebODM ont des distributions similaires. Cependant, des valeurs de différence altimétrique négatives et positives distinctes ont été constatées par rapport à la référence (Figure 11).

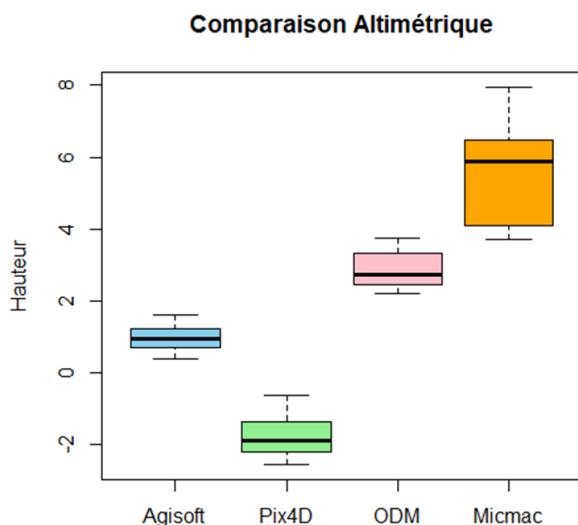
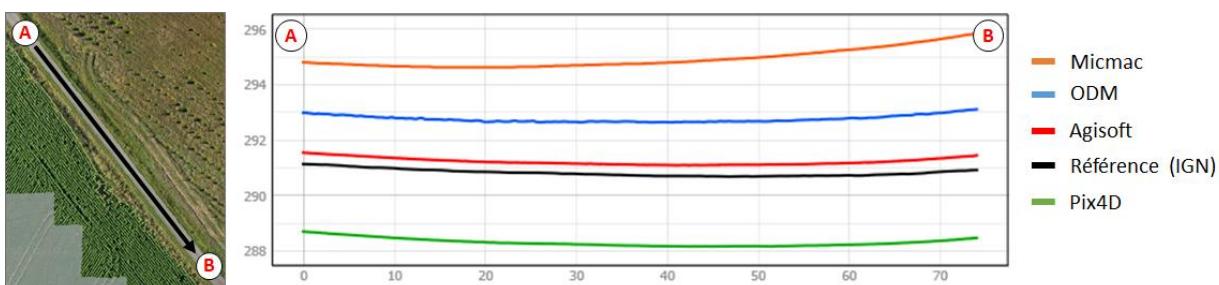


Figure 11 - Box-plot des hauteurs des échantillons par rapport à la référence IGN.

Pour illustrer plus visuellement les différences entre les résultats, en plus de points de contrôle, un profil topographique a été réalisé sur une zone plane du terrain pour comparer les différentes données produites, y compris la référence IGN. On peut constater des valeurs inférieures à la référence IGN pour Pix4D Mapper, ainsi qu'un écart positif significatif pour WebODM et surtout pour Micmac. Enfin, **Agisoft** présente la plus faible différence par rapport à la référence IGN (Figure 12).



En orange, ligne supérieure appartient à Micmac ; en bleu, la ligne secondaire appartient à ODM ; en rouge, la ligne la troisième à Agisoft ; en noir, ligne appartient à la référence (IGN), et en vert, ligne inférieure appartient à Pix4D.

Figure 12 - Profil de trace topographique.

Pour comparer les données LiDAR de l'IGN et les données issues de la photogrammétrie, les altitudes en MNH ont été calculées. La donnée LiDAR HD de l'IGN date de juillet 2021, tandis que celles de drone pour la photogrammétrie sont de juin 2022. L'analyse montre que pour la parcelle étudiée, la différence moyenne de hauteur est de 1,082 mètres (près de l'écart moyen trouvé par les échantillons précédemment), avec une variation de hauteur allant de 0,073 à 2,412 mètres (Tableau 13).

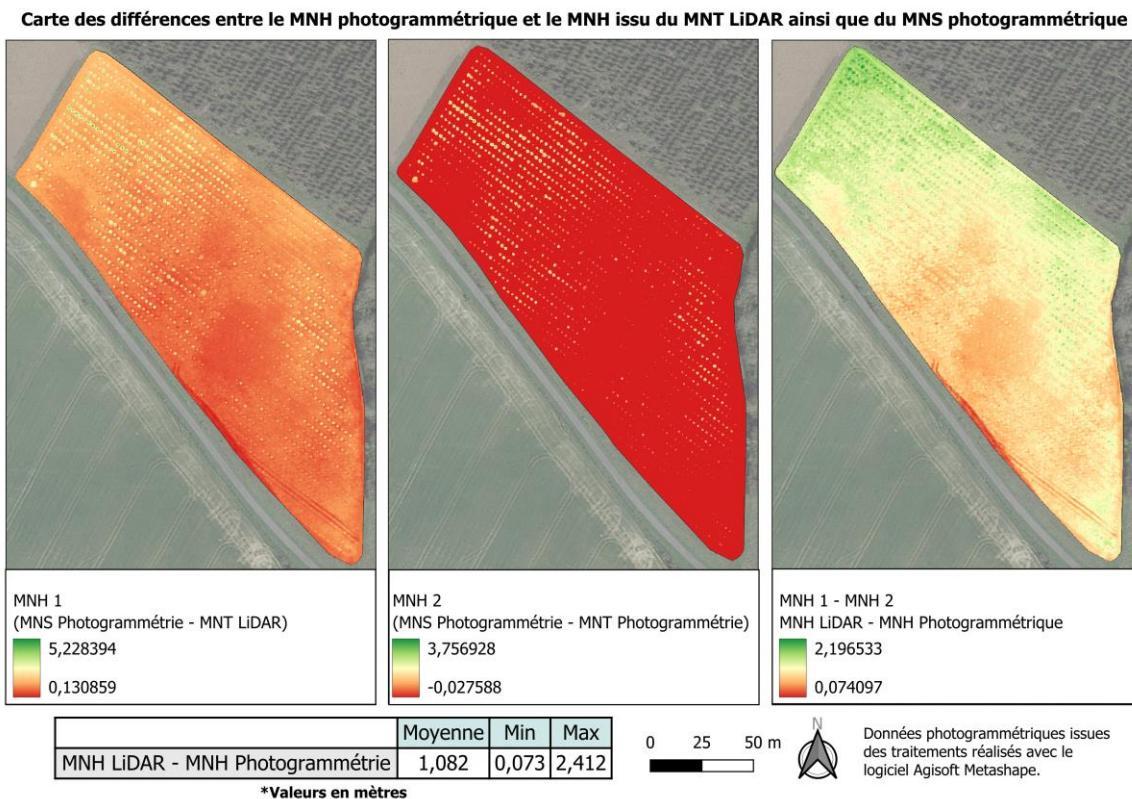


Figure 13 - Comparatif entre MNH issus des données photogrammétriques et LiDAR.

3.5.2. Critères Qualitatifs

Langues disponibles

À l'exception de Micmac, conçu spécifiquement pour des organisations françaises mais susceptible d'une mise à jour future qui en accroîtrait sa visibilité, tous les logiciels comparés sont largement utilisés dans le monde entier pour des tâches de photogrammétrie. En général, les développeurs et les distributeurs des quatre logiciels analysés ont souhaité les rendre disponibles dans plusieurs langues, notamment en anglais et en français (Tableau 12).

Tableau 12 - Langues disponibles d'utilisation dans les logiciels.

Critères	Agisoft Metashape	Pix4D Mapper	WebODM	Micmac
Langues disponibles	Français, anglais et autres			

Facilité d'utilisation

Suivant une logique de standardisation des logiciels, tous, à l'exception de Micmac, sont intuitifs, nécessitant seulement une formation de base sur leurs particularités et la configuration des paramètres pour une meilleure maîtrise (Tableau 13).

Les terminologies employées dans MicMac pour désigner les traitements et configurations ne facilitent pas son utilisation, en plus de posséder une interface graphique utilisateur (Graphical User Interface - GUI) en plein développement, le rendant ainsi encore complexe à configurer. En revanche, WebODM se distingue par la simplicité et la praticité de son interface graphique, le rendant facile à configurer et à l'utiliser pour les traitements.

Entre les logiciels commerciaux Agisoft Metashape et Pix4D Mapper, les deux suivent la même logique d'architecture et sont intuitifs à leur utilisation.

Tableau 13 - Classification de facilité d'utilisation.

Critères	Agisoft Metashape	Pix4D Mapper	WebODM	Micmac
Facilité d'utilisation	★★★★★	★★★★★	★★★★★	★

Facilité d'installation

L'installation des logiciels commerciaux payants comme Agisoft Metashape et Pix4D Mapper est simple et intuitive à partir de leur site internet. En revanche, pour les logiciels gratuites et open source comme Micmac et WebODM, il existe des difficultés supplémentaires pour les rendre opérationnels (Tableau 14).

Pour Micmac, son fichier d'installation est difficile à trouver en plus de dépendre d'autres logiciels externes auxiliaires pour fonctionner (CloudCompare, ImageMagick, Exiftool). Pour WebODM, le principal problème réside dans la configuration de la machine, particulièrement sous Windows, nécessitant l'installation d'un émulateur Linux et la configuration du partage des ressources entre les deux systèmes d'exploitation pour un fonctionnement correct.

Tableau 14 - Classification de facilité d'installation.

Critères	Agisoft Metashape	Pix4D Mapper	WebODM	Micmac
Facilité d'installation	★★★★★	★★★★★	★★	★★

Personnalisation des traitements

Tous les logiciels offrent de grandes possibilités de personnalisation des traitements, permettant de modifier les configurations à chaque étape. Cependant, les logiciels commerciaux Agisoft Metashape et Pix4D Mapper se distinguent par la possibilité de faire des ajustements fins et de nettoyer les imperfections des résultats entre les étapes.

En revanche, pour WebODM et Micmac, les personnalisations doivent être obligatoirement configurées dès le début, avant de lancer le traitement qui se déroule en mode pipeline ou encore de les lancer en faisant des changements par ligne de code (Tableau 15).

Tableau 15 - Classification de possibilité de personnalisation des traitements.

Critères	Agisoft Metashape	Pix4D Mapper	WebODM	Micmac
Personnalisation des traitements	★★★★★	★★★★★	★★★★	★★★

Présence de bruit

Les bruits, pouvant correspondre aux données manquantes, aux distorsions, etc., sont fréquemment observés sur les bords des images issues de traitements photogrammétriques. Cela est dû au manque de données provenant d'autres angles de vue, ce qui rend la phase d'orthoréctification moins efficace et complique la réorientation des éléments au nadir. C'est pour cette raison qu'une zone de marge est programmée, afin de préserver les zones d'intérêt. Ainsi, le problème se pose lorsque la distorsion ou le manque de données se produit dans les régions centrales de l'image.

Pour les données de photogrammétrie utilisées dans cette étude, aucune de ces problématiques n'a été rencontrée en dehors des bordures des images (Figure 14), ce qui indique des résultats de qualité et un traitement adéquat sur l'ensemble de tous les logiciels analysés.

Tableau 16 - Classification de présence de bruits.

Critères	Agisoft Metashape	Pix4D Mapper	WebODM	Micmac
Présence de bruit	★★★★★	★★★★★	★★★★★	★★★★★
	 Metashape	 Pix4D Mapper	 WebODM	 Micmac

Figure 14 - Exemple de bruits marginaux issus des traitements photogrammétriques.

Coût

Le logiciel Micmac est complètement gratuit et open source.

WebODM est développé pour Linux et est disponible gratuitement. Toutefois, il offre aussi une version payante (64\$) avec un installateur et une assistance technique pour Windows et MacOS, avec des tarifs variables selon la version.

Pour les logiciels commerciaux, les deux sont payants. Pix4D Mapper est vendu directement sur le site de l'entreprise sous licence flottante et abonnement perpétuel, au prix le plus élevé parmi les logiciels analysés, soit 4 690 €. Agisoft Metashape, également sous licence flottante et abonnement perpétuel, est vendu sur le site officiel de l'entreprise uniquement en dollars pour 3 499 \$ ou via des revendeurs français pour environ 3 270 € (Tableau 17).

Tableau 17 - Coût des logiciels de photogrammétrie.

Critères	Agisoft Metashape	Pix4D Mapper	WebODM	Micmac
Coût	Payant (3 270€)	Payant (€4 690)	Gratuit (Linux) / Payant (Windows \$64)	Gratuit

4. Identification des arbres

4.1. Introduction à l'identification

Après avoir réalisé les différentes étapes de traitement photogrammétrique et obtenu les résultats cartographiques, il est possible de réaliser des traitements complémentaires pour analyser individuellement des structures. Une des approches possibles est l'**identification** de structures telle que l'individualisation des arbres, par exemple. Pour cela, une méthode de chaque approche est retenue, notamment celle basée sur des objets, pour sa capacité aussi à analyser les différences morphologiques, y compris la condition de santé des arbres.

Dans cette approche d'identification, il est possible d'utiliser deux différents groupes de méthodes :

- 1) **La détection** ;
- 2) **La segmentation**.

La plus grande différence entre ces deux groupes de méthodes réside dans l'objectif final et la précision de l'identification d'une structure. Tandis que la **détection** se contente de pointer ponctuellement un arbre ou d'englober sa couronne dans une boîte englobante (bbox), la **segmentation** vise à identifier précisément chaque élément constituant une structure à l'aide d'un polygone irrégulier, comme un houppier par exemple (Figure 15).

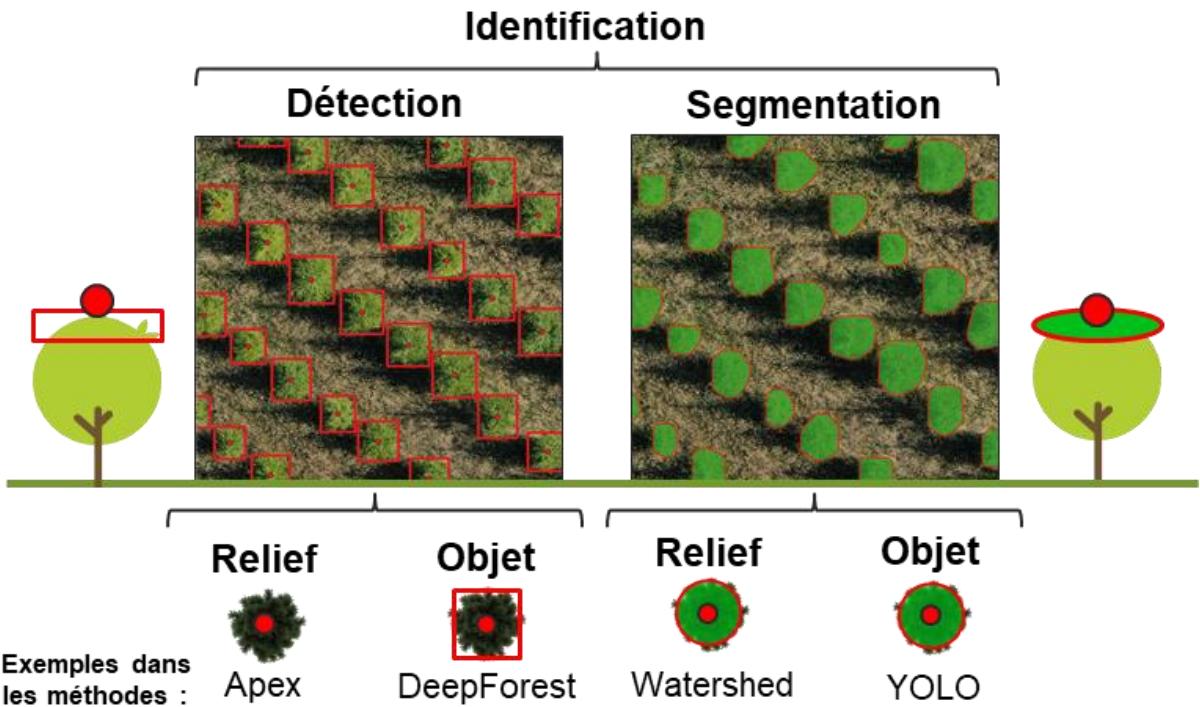


Figure 15 - Méthodes d'identification.

Au sein de ces deux méthodes, deux principales approches se différencient par les sources de données et leur mode d'emploi :

1) une approche basée sur le relief :

L'approche basée sur le relief utilise un Modèle Numérique de Hauteur (MNH), calculé à partir d'un Modèle Numérique de Surface (MNS) et d'un Modèle Numérique de Terrain (MNT). Elle perçoit les variations du relief, détecte les sommets les plus hauts (Apex) et segmente les zones adjacentes.

Un des inconvénients de cette approche est qu'elle nécessite un MNT de bonne qualité. Toutefois, il est parfois impossible d'obtenir un bon MNT par photogrammétrie à cause de la densité de la végétation, ce qui empêche la capture de données suffisantes du sol pour former une vision correcte du relief du terrain.

Néanmoins, c'est une méthode qui offre un traitement automatique et ne nécessite pas la création d'un modèle prédictif.

2) une approche basée sur l'objet :

L'approche basée sur l'objet utilise des orthomosaïques et poursuit l'entraînement d'un modèle à l'aide de Réseaux Neuronaux Convolutifs (CNN), puis applique ce modèle pour la prédiction des objets via la technique du Machine Learning (ML). À ces étapes, des classes sont définies selon les caractéristiques visuelles des pixels, telles que la couleur, la texture et la forme, afin de regrouper les similarités et délimiter les objets d'intérêt (Weinstein et al., 2019).

L'un des principaux désavantages de cette méthode est la difficulté, voire l'impossibilité, de distinguer les houppiers dans des végétations très denses où les houppiers sont collés entre eux, comme dans les forêts de feuillus. Cependant, c'est une méthode modulable selon les

caractéristiques de la parcelle. Le résultat dépendra du modèle d'apprentissage créé et des critères définis par l'utilisateur.

Ces deux méthodes d'identification, avec les deux différentes approches, peuvent être très utiles pour une analyse plus détaillée des parcellaires forestières. Elle peut permettre d'identifier avec précision les arbres, de quantifier leur nombre, de fournir des données sur leur hauteur, suivre l'état sanitaire et encore d'autres analyses possibles au niveau du houppiers (Gu et al., 2020 ; Gan et al., 2023).

En plus, afin d'évaluer les différentes méthodes, les arbres de la parcelle d'étude ont été comptés manuellement par photo-interprétation, totalisant 1543 arbres (Figure 16).



Figure 16 - Carte de dénombrement d'arbres par photo-interprétation.

4.2. Détection des arbres

4.2.1. Introduction sur la méthode de détection des arbres

La détection est une technique pour identifier les objets d'intérêt de manière ponctuelle, avec une option d'individualisation plus grossière à l'aide d'un rectangle englobant chaque objet détecté.

Pour cette étude, un outil de détection pour chaque approche a été testé :

1) Détection basée sur le relief (Apex) :

Dans une approche basée sur le relief, la méthode **Apex** fonctionne initialement en calculant le MNH à partir des données de MNS et de MNT de la même zone. Ensuite, un lissage est réalisé à l'aide d'un filtre gaussien pour homogénéiser le modèle numérique et éviter les fausses détections multiples (Pouliot et al., 2002). Enfin, les points les plus hauts de chaque sommet sont identifiés ponctuellement pour détecter les houppiers individuels (Figure 17).

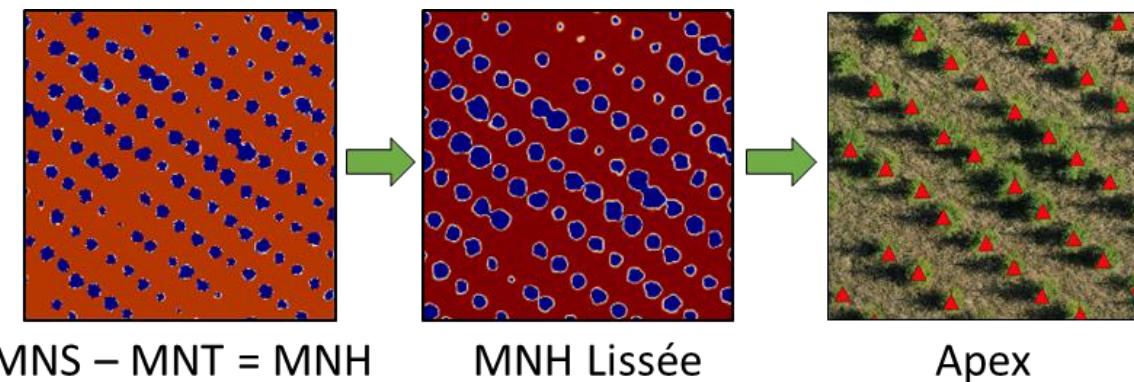


Figure 17 - Flux de traitement de détection basée sur le relief Apex - SAGA.

Ce premier traitement est réalisé en utilisant le logiciel SAGA v.7.8.2. Il est également proposé dans d'autres outils, comme par exemple via des scripts R utilisant la bibliothèque LidR.

2) Détection basée sur l'objet (DeepForest) :

Une autre approche de détection se base sur l'entraînement d'un modèle de prédiction. Elle est réalisée avec **DeepForest** et permet de détecter l'emprise des houppiers (Sivanandam & Lucieer, 2022). C'est cette méthode que nous avons retenu pour l'étude.

4.2.2. Méthode retenue : DeepForest

DeepForest est une méthode de détection des arbres par une approche basée sur l'objet. Elle est disponible sur package Python de détection des objets à partir d'images aériennes développé par Weecology (Ecology Research Group at University of Florida). Il comprend des modèles pour la détection des houppiers d'arbres mais également des oiseaux.

Utilisant également des réseaux de détection d'objets par apprentissage profond, DeepForest prédit des boîtes englobantes autour des arbres dans des images RGB. Basé sur le module de détection d'objets de Torchvision (partie de la bibliothèque PyTorch - framework de machine learning open source), il simplifie l'entraînement des modèles de détection.

C'est un type de traitement basé sur un modèle pré-entraîné par des images d'arbres variées. Toutefois, il est conseillé d'effectuer un entraînement personnalisé pour améliorer et spécifier les caractéristiques du type d'arbre d'intérêt.

- Documentation package DeepForest :
<https://deepforest.readthedocs.io/en/latest/index.html>

La version développée pour les traitements du projet comprend un script Python totalisant 480 lignes de code.

Pour cette méthode d'identification des arbres par détection, trois étapes principales sont considérées (Figure 18) :

1. **Tuilage** : L'image, contenant les arbres qui serviront à entraîner le modèle, est découpée en petites tuiles à l'aide du code Python.
2. **Labélisation** : Des polygones sont créés et nommés à l'aide de l'outil "Label Studio" pour marquer les zones où les arbres sont présents.
3. **Entraînement et application du modèle** : Le modèle de détection est entraîné, validé et appliqué à l'aide du code Python, fournissant des données au format vectoriel, représentant les points et les polygones des arbres détectés.

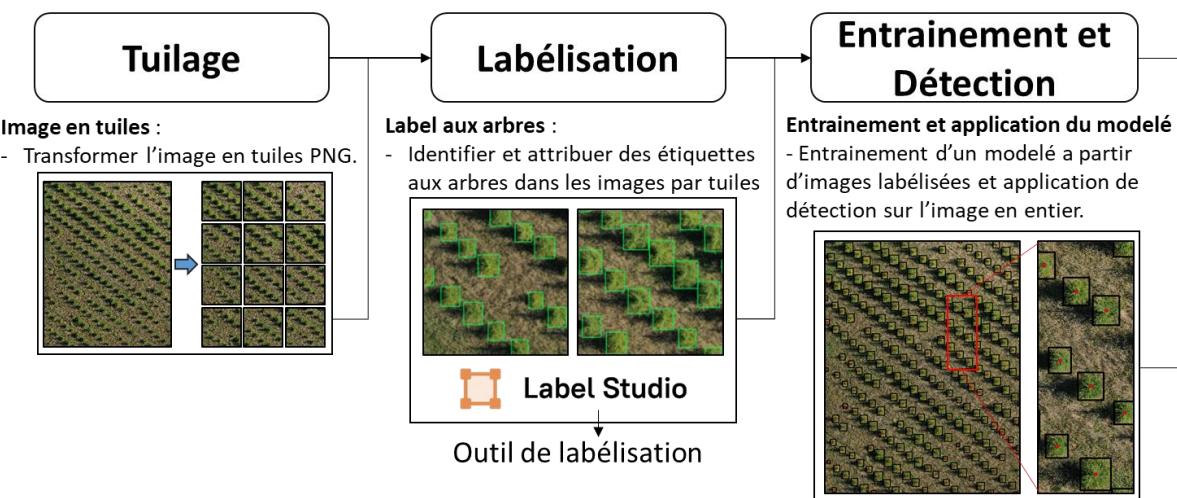


Figure 18 - Flux de traitements pour la détection avec l'algorithme DeepForest.

4.2.3. Résultats

DeepForest s'est révélé être un bon moyen de détection des houppiers, malgré une surestimation due à la détection erronée des végétations herbacées ou à la fragmentation des houppiers en les détectant en double. Cela pourrait être dû à une étape de labellisation incorrecte qui aurait mal formé le modèle.

Malgré ce problème, le taux de précision est considéré comme satisfaisant par rapport à l'objectif de l'étude, avec 1733 détections par le modèle pour 1523 arbres comptés manuellement (Figure 19).

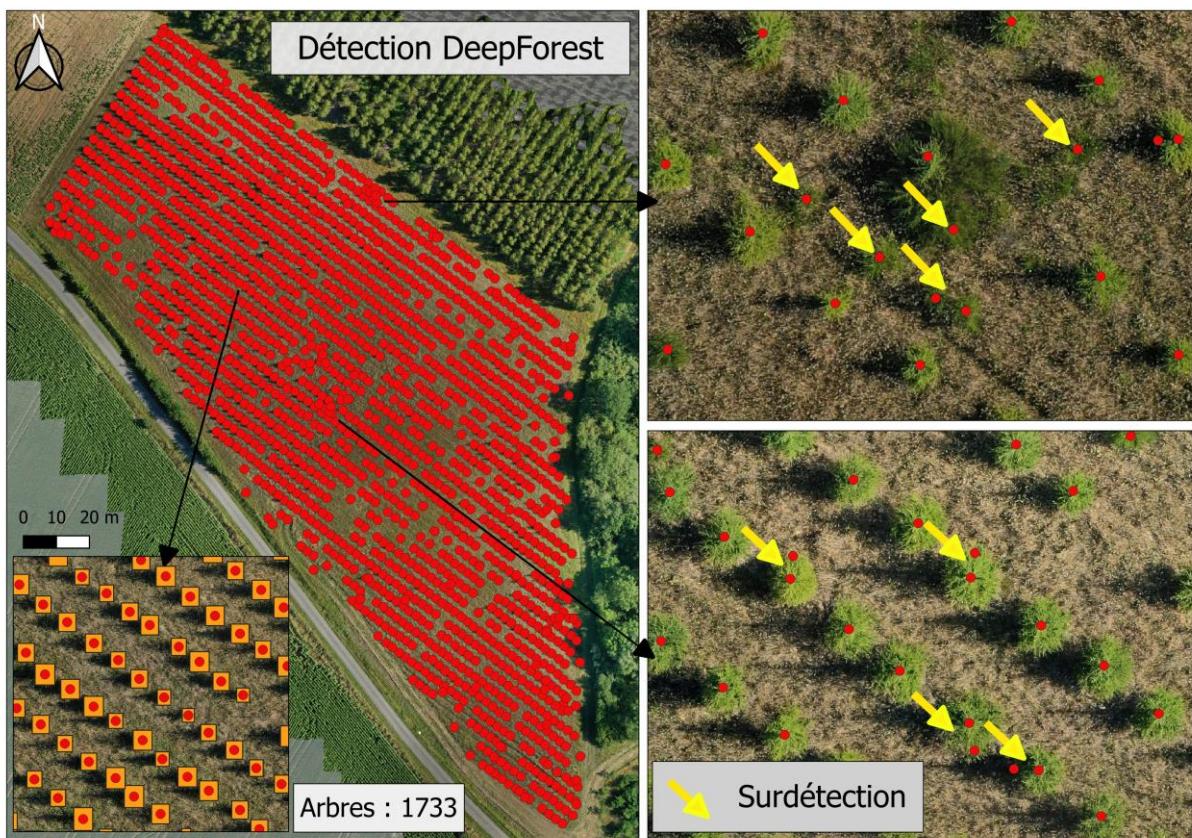


Figure 19 - Carte des résultats du traitement de détection par la méthode DeepForest.

4.3. Segmentation des houppiers

4.3.1. Introduction sur les différentes méthodes de segmentation

La segmentation est une technique qui consiste à diviser une image en plusieurs régions ou objets significatifs. Cette méthode est très utile et permet des analyses forestières précises, notamment au niveau des houppiers.

Pour cette étude, un outil de segmentation pour chaque approche a été testé :

1) Segmentation basée sur relief (Watershed) :

Comme dans la méthode de détection basée sur le relief, le calcul de l'Apex à partir du MNH de lissage gaussienne est également réalisé. En outre, la zone de relief entourant l'objet ciblé est délimitée à l'aide des sommets, puis segmentée à l'aide d'un polygone irrégulier plus précis pour définir l'objet.

La méthode appelée **Watershed** est une alternative pour ce type de traitement de segmentation en utilisant le logiciel SAGA v.7.8.2. Cela commence par un lissage à l'aide d'un filtre gaussien du MNH calculé, suivi du traitement Watershed (Figure 20).

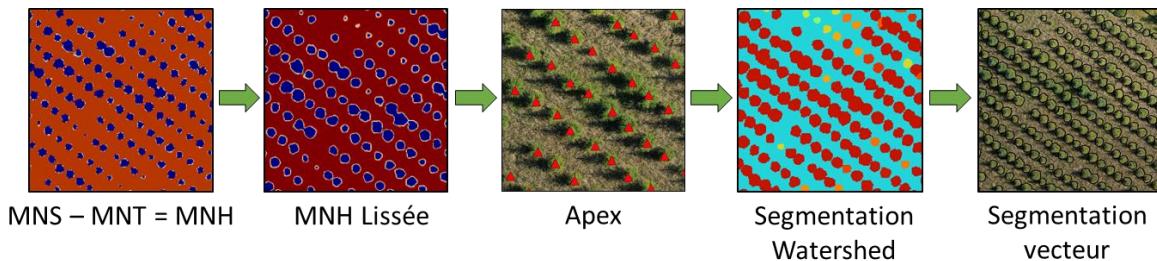


Figure 20 - Flux de traitements de segmentation Watershed.

2) Segmentation basée sur l'objet :

YOLO est une méthode qui combine plusieurs techniques d'intelligence computationnelle dans une approche simple à mettre en place. Elle peut être appliquée sans nécessité de connaissances approfondies en programmation via l'utilisation du plug-in Deepness disponible sur QGIS et intégration d'autres sites internet. Elle intègre toute la complexité derrière des interfaces utilisateur simple, ainsi que des interfaces graphiques pour l'entraînement de nouveaux modèles, permettant ainsi à l'utilisateur de traiter facilement ses données.



- Documentation segmentation Deepness YOLO: <https://qgis-plugin-deepness.readthedocs.io/en/latest/>

Il existe également la méthode **Detectree2**. C'est un package Python qui permet la segmentation automatique des houppiers d'arbres à partir d'images aériennes RGB développé par Ultralytics, en utilisant les algorithmes de segmentation d'objets de Detectron2. Il utilise l'architecture de Mask Region-based Convolutional Neural Network (Mask R-CNN), un modèle d'apprentissage profond qui combine la détection d'objets et la segmentation d'instances (extension de l'architecture Faster R-CNN), avec la bibliothèque de Machine Learning open source PyTorch. Il se base sur des modèles pré-entraînés sur les forêts de Malaisie pour les étapes de segmentation, mais offre également la possibilité de s'entraîner avec les propres données de l'utilisateur.



- Documentation segmentation Detectree2 : <https://patball1.github.io/detectree2/>

En plus des méthodes de techniques d'apprentissage supervisées mentionnées précédemment, il existe des méthodes de segmentation non supervisée, comme celle de la bibliothèque **Orfeo ToolBox (OTB)**. Cependant, la méthode de l'OTB n'est pas adaptée à ce travail, car elle repose sur des différences de pixels généralisées dans l'image, sans identification préalable des cibles d'intérêt. L'objectif de ce projet est d'identifier et de segmenter des objets spécifiques. Dans un environnement forestier à petite échelle, où les pixels sont très hétérogènes, cette approche peut entraîner beaucoup de bruit dans la segmentation (De Luca et al., 2019).



- Documentation segmentation OTB : https://www.orfeo-toolbox.org/CookBook/Applications/app_Segmentation.html

4.3.2. Méthode de segmentation retenue : YOLO

Nous avons retenu la méthode YOLO (You Only Look Once), qui est un algorithme basé dans les principes de Region-based Convolutional Neural Network (R-CNN). Il s'agit d'un type d'architecture d'apprentissage profond utilisé pour la détection et segmentation d'objets (Girshick et al., 2014). Dans la méthode de YOLO, l'image est divisée en grille où chaque cellule prédit des boîtes englobantes et des probabilités de classe, augmentant ainsi son efficacité et sa rapidité. Il utilise une approche de régression unique, effectuant toutes les prédictions simultanément en une seule passe à travers la grille (Chen et al., 2023 ; Xu et al., 2023).

Deepness est un outil sous forme de plug-in disponible sur QGIS qui permet de charger un modèle entraîné par YOLO et d'effectuer des traitements de détection et segmentation (Figure 21).

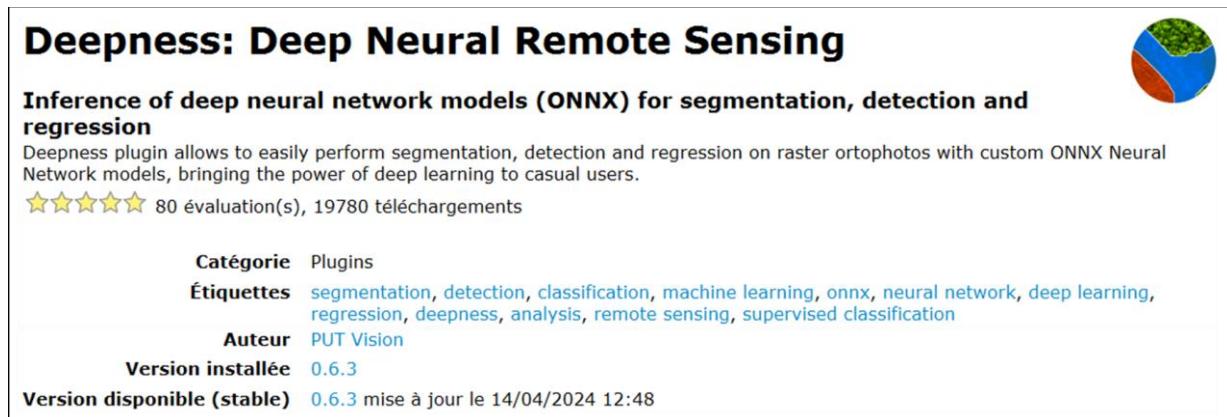


Figure 21 - Plug-in Deepness sur QGIS.

Dans l'objectif de simplifier au maximum le processus, sans entrer dans les détails des algorithmes et pour qu'il soit simple d'utilisation pour tous les agents CNPF intéressées, toutes les étapes de l'entraînement et de l'application du modèle pour la segmentation sont effectuées via les interfaces graphiques. La seule partie de code requise est fournie par les outils, et il suffit de la copier et de la coller dans l'environnement Python pour les faire fonctionner.

Pour la segmentation des arbres dans la méthode YOLO, quatre étapes principales sont considérées (Figure 22) :

1. **Tuilage** : L'image, contenant les arbres qui serviront à entraîner le modèle, est découpée en petites tuiles à l'aide de l'outil Deepness (plug-in QGIS) ;
2. **Labélisation** : Les tuiles sont intégrées dans l'outil en ligne "Roboflow" et des polygones sont créés par l'opérateur pour marquer les zones où les arbres sont présents ;
3. **Entraînement du modèle** : Les images tuilées et labellisées sont importées sur le site "Ultralytics" et le modèle de segmentation est entraîné et validé à l'aide de code Python fourni par le site, et résultant en un fichier .ONNX avec le modèle entraîné ;
4. **Application du modèle** : Sur le logiciel QGIS, avec le plug-in Deepness, le modèle est appliqué à la zone d'intérêt, résultant en une couche Shape file (.shp) QGIS avec les polygones des houppiers segmentés.

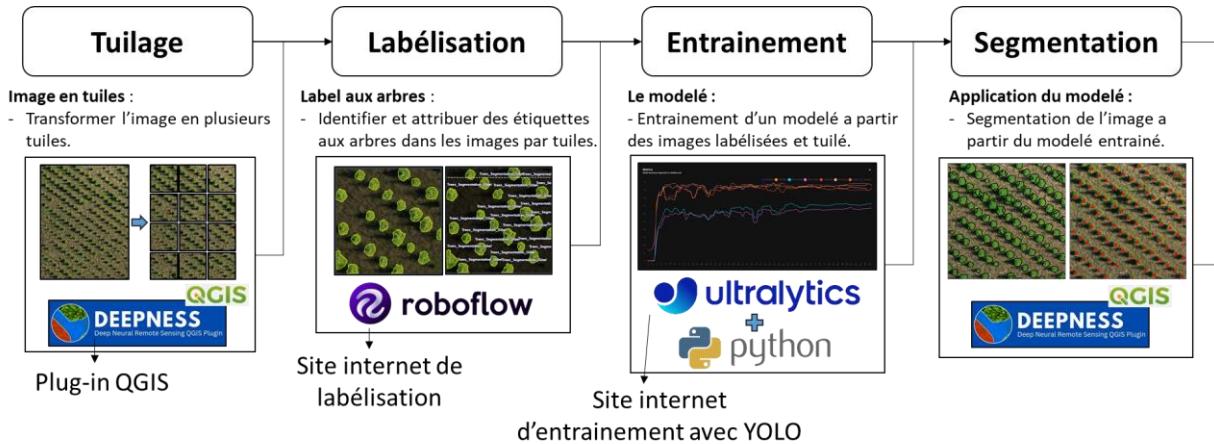


Figure 22 - Flux de travail de segmentation YOLO via interfaces graphiques.

Après avoir appliqué le modèle de segmentation, il est également possible de compter les arbres en utilisant le calcul des centroïdes des polygones segmentés (Figure 23).

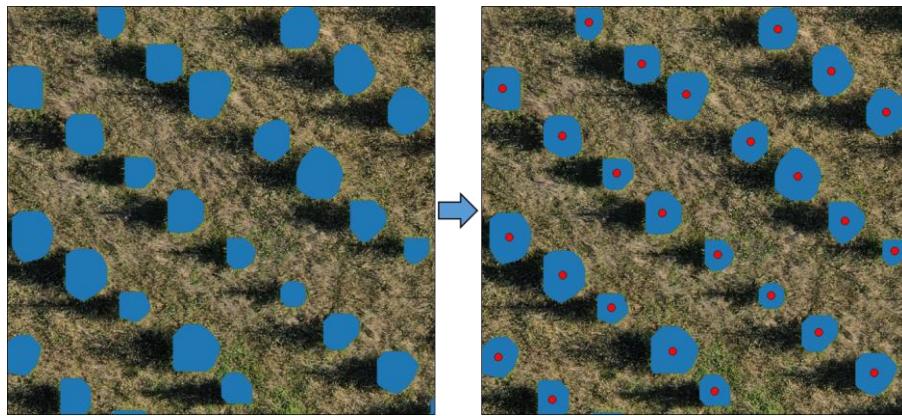


Figure 23 - Comptage des arbres par calcul des centroïdes des polygones segmentés.

Cependant, les tuiles peuvent parfois contenir des objets d'intérêt partiellement coupés sur les bords de l'image et ainsi entraîner une sur-détection problématique. Cette sur-détection est principalement due à la segmentation fragmentée des houppiers, où le calcul des centroïdes peut compter deux arbres au lieu d'un. Pour éviter cette segmentation fragmentée, il est recommandé de privilégier la labellisation complète des arbres et de ne pas labelliser ceux partiellement situés sur les bords des tuiles lors de la préparation du modèle (Figure 24).

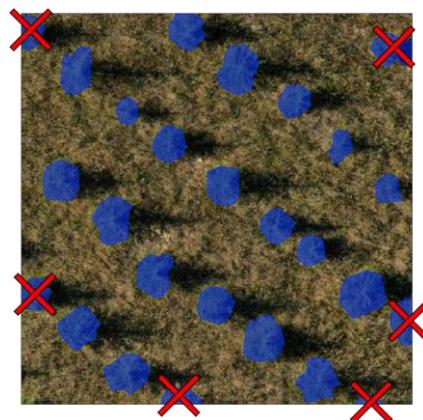


Figure 24 - Exemple de labellisation en excluant les éléments marginaux.

4.3.3. Résultats

Le résultat du traitement de segmentation aboutit à des polygones prédisant l'emplacement des houppiers des arbres (Figure 25). Ces prédictions ont été effectuées après l'entraînement du modèle YOLO et appliquées sur l'image à l'aide du plug-in Deepness.



Figure 25 - Résultat de la segmentation par la méthode YOLO.

Cette méthode s'est révélée simple et efficace pour le traitement de la segmentation d'images. Elle peut être entièrement réalisée via des interfaces graphiques accessibles à toute personne ayant des notions de base en informatique. De plus, les résultats statistiques de l'entraînement du modèle sont faciles à comprendre et, en cas de besoin d'améliorations, il est possible de reprendre l'entraînement du modèle à différentes étapes.

Pour la zone d'étude située à Gobel, plusieurs paramètres ont été analysés :

- **mAP50** : Précision moyenne à un seuil de 50%. Mesure les détections faciles ;
 - **mAP50-95** : Précision moyenne à des seuils de 50% à 95%. Évalue la performance globale ;
 - **Précision (P)** : Mesure combien de détections sont correctes ;
 - **Recall (R)** : Capacité du modèle à détecter tous les objets ;
 - **(M)** : fait référence à la moyenne "macro", qui calcule la métrique de performance moyenne pour chaque classe.
 - **(B)** : fait référencé à la meilleure métrique "best" de performance obtenue par le modèle durant l'entraînement.
- | |
|----------------------|
| 0,994 : mAP50(B) |
| 0,994 : mAP50(M) |
| 0,875 : mAP50-95(B) |
| 0,856 : mAP50-95(M) |
| 0,998 : precision(B) |
| 0,998 : precision(M) |
| 0,977 : recall(B) |
| 0,977 : recall(M) |

Il a été possible d'obtenir une très haute précision (P) de 99,8%, un bon rappel (R) de 97,7%, ainsi qu'une mAP50-90 moyenne remarquable de 85,6% (Figure 26). Cela indique qu'il s'agit d'un très bon modèle capable de prédire la végétation avec bonne exactitude.

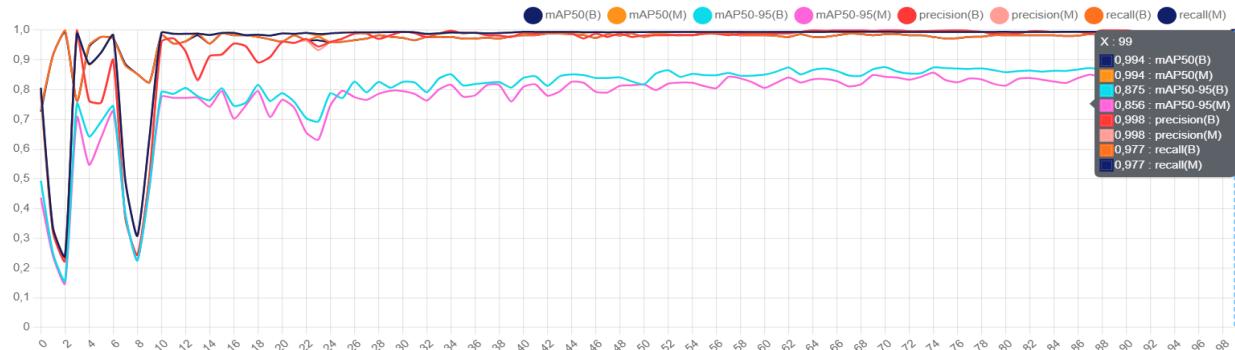


Figure 26 - Graphique des statistiques d'entraînement.

Les résultats de cette étude de cas, en comparaison aux données de photo-interprétation, ont montré que le modèle entraîné était de bonne qualité, car sur les 1543 arbres comptés manuellement, le modèle en a prédit 1584, témoignant ainsi d'un bon entraînement (Figure 27).

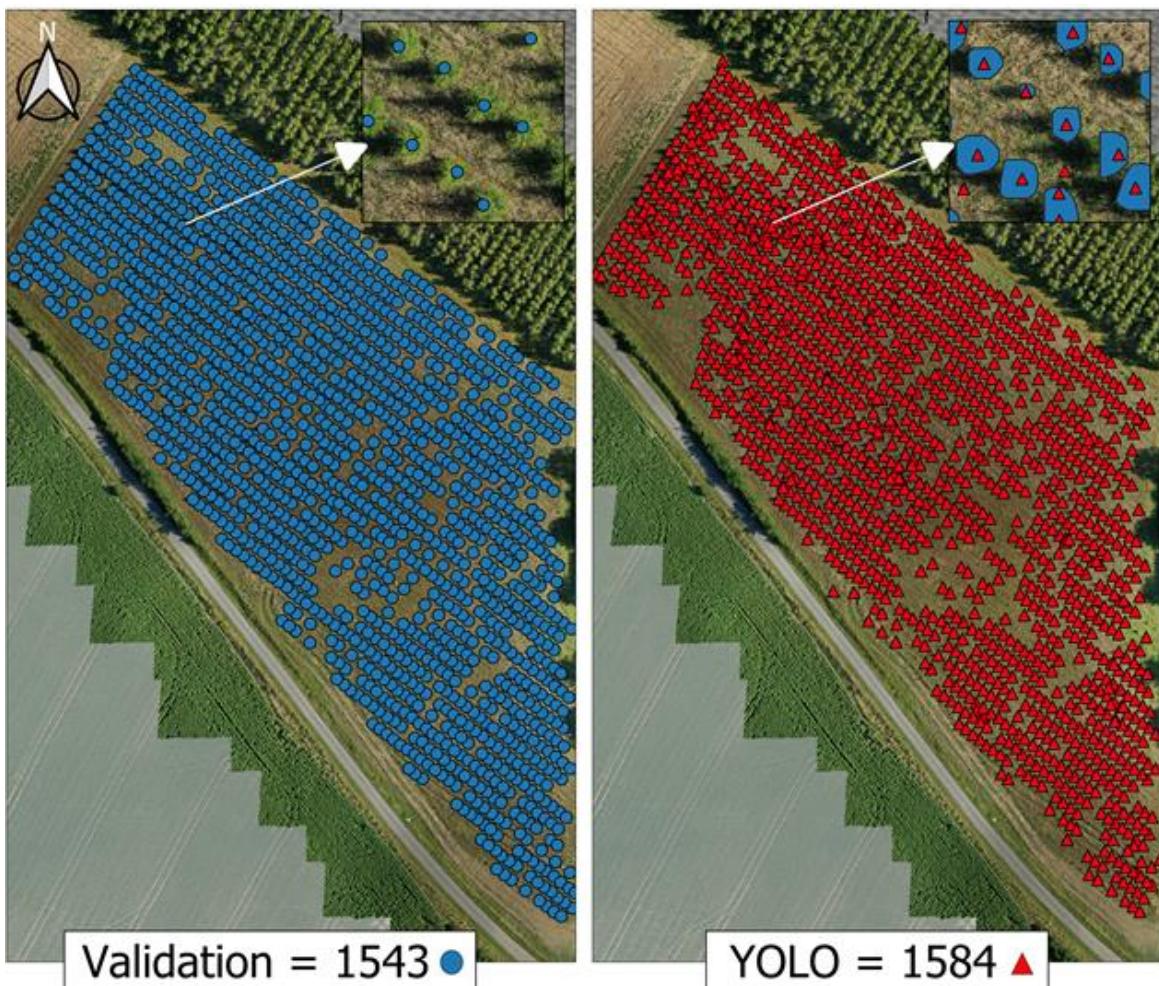


Figure 27 – Comparaison du dénombrement YOLO vs validation par photo-interprétation.

4.4. Synthèse des méthodes d'identification et discussion

La diversité des méthodes d'**identification des houppiers** (détection et segmentation), ainsi que les différences entre les **approches (basée sur le relief et basée sur l'objet)**, les zones d'étude ainsi que les données pouvant être utilisées, ne permettent pas de définir la meilleure méthode. Cependant, parmi les options présentées, les données disponibles et en analysant les caractéristiques de la parcelle d'étude, certaines méthodes se distinguent.

Pour une simple **identification basée sur le relief**, les méthodes **Apex** et **Watershed** sont complémentaires et peuvent répondre à l'objectif de détection et segmentation, sous réserve que les conditions de différenciation entre MNS et MNT permettent la création d'un bon M NH. Lorsque des **données d'orthomosaïques** sont disponibles dans un scénario de densité végétale permettant de distinguer les arbres, la méthode **YOLO** est plus appropriée à la **l'identification**, plus précisément à la **segmentation** des houppiers. En revanche, DeepForest s'est révélé moins efficace, mais reste néanmoins une option alternative possible.

Néanmoins, en disposant à la fois de meilleures données de relief et orthomosaïque, les résultats présentés dans cette étude montrent que la meilleure option est l'utilisation de la méthode de segmentation basée sur l'objet avec **YOLO**. Cette approche permet de produire un modèle entraîné efficace, qui offre une meilleure précision et exactitude pour les résultats.

5. Conclusion sur les analyses, comparaison de méthodes et résultats

L'objectif de cette étude était d'explorer les possibilités et les limites du traitement de données issues de drones RGB en photogrammétrie. Différents logiciels commerciaux et gratuits ont été comparés pour comprendre leurs points forts et leurs faiblesses. De plus, après avoir obtenu des résultats photogramétriques, divers méthodes d'identification, tant en détection qu'en segmentation, ont été examinées pour évaluer leurs avantages et leurs inconvénients.

Le jeu de données utilisé dans l'étude pour la comparaison entre les logiciels était de bonne qualité, avec de bons paramètres pour la collecte des données, bien qu'il n'y ait pas eu de calibration géographique via RTK embarqué ou de points de contrôle au sol. La qualité des données a évité des problèmes potentiels de lacunes ou de discordances importantes entre les résultats, facilitant ainsi le traitement pour la plupart des logiciels testés.

Étant donné que l'analyse dans ce travail est de nature comparative, les logiciels ont été jugés en fonction des avantages et des inconvénients identifiés au cours des traitements. Toutefois, il est important de noter que le choix final revient à l'utilisateur et à ses besoins pour déterminer le logiciel le mieux adapté au contexte d'utilisation.

Pour le logiciel **Agisoft Metashape**, logiciel commercial, malgré sa plus faible densité de points dans le nuage de points dense par rapport aux autres logiciels, il a présenté les meilleurs résultats : meilleure résolution de l'orthomosaïque, meilleures précisions planimétrique et altimétrique, ainsi qu'un temps de traitement plus rapide. Cela démontre son potentiel ainsi que sa bonne capacité à traiter les données.

Concernant **Pix4D Mapper**, logiciel aussi de la gamme commercial, il a été également efficace, bien que son temps de traitement plus long et que les résultats soient moins précis en planimétrie et altimétrie. L'importante durée de traitement peut être liée à un volume important du nuage de points dense créé, qui nécessite donc plus de ressources machine et de temps. Ce volume accru de points impacte également directement les étapes suivantes.

WebODM, logiciel gratuit, s'est révélé très intéressant en raison de sa simplicité et robustesse pour la formation des bons résultats. Ses résultats ne sont pas aussi précis ni de résolution aussi fine, mais ils sont suffisantes pour leurs exploitation. Cependant, sa capacité de traitements de grands volumes de données est directement liée à la quantité de ressource de la machine disponible.

Micmac, le logiciel développé par l'IGN, a rencontré des difficultés significatives liées à la gestion de grandes quantités de photos et à des formats de données en sortie peu conventionnels. Actuellement, l'outil est en phase de restructuration et de développement pour une nouvelle version plus performante (<https://sites.google.com/view/micmacv2-satellite/acceuil>). Bien que l'utilisation complète de l'application ait été compromise, avec parfois des résultats incomplets, le dialogue avec les développeurs a été très bénéfique pour identifier ces limites et explorer les possibilités. Cette étude pourrait contribuer à une future version améliorée du logiciel (Annexe C : Échanges et versions Micmac).

Pour conclure, l'analyse photogrammétrique des arbres est complexe, car des conditions optimales et des paramètres corrects lors de l'acquisition des données sont cruciaux pour garantir la qualité des photos capturées. Étant donné que les arbres sont rarement immobiles, cela peut affecter la précision et qualité des résultats obtenus.

Pour comparer les méthodes d'**identification** (déttection et segmentation), les performances varient selon le matériel et l'**approche choisie** (basées sur le relief ou sur l'objet). Pour la détection avec des Modèles Numériques de Hauteur (MNH), la méthode Apex est recommandée. Pour la segmentation avec ces mêmes données, la méthode Watershed est appropriée. Pour la détection à partir de données d'orthomosaïque, la méthode DeepForest est efficace, tandis que pour la segmentation, la méthode YOLO est la plus performante.

En somme, parmi toutes les méthodes et indépendamment des caractéristiques particulières d'application, YOLO se distingue avec ses résultats très précis et proches des données de validation issues de la photo-interprétation.

6. Retour d'expérience

D'un point de vue personnel, j'ai eu une expérience unique et très enrichissante dans les études de télédétection appliquée au domaine forestier pendant ces 10 mois d'alternance à l'IDF au CNPF (Annexe A : Diagramme de Gantt). J'ai eu l'opportunité de participer à plusieurs projets comportant différentes analyses, utilisant une variété d'ensembles de données et de méthodes pour atteindre les résultats, à destination des partenaires ou des propriétaires forestiers. J'ai également bénéficié d'un excellent soutien de l'équipe avec laquelle j'ai travaillé, ce qui m'a permis d'interagir étroitement avec les projets en cours et de résoudre facilement mes doutes.

Dans les activités auxquelles j'ai participé, mon principal axe de travail a été la télédétection par satellite et drone, en manipulant des données d'images RGB, multispectrales et LiDAR. Cela m'a permis de développer de solides compétences en photogrammétrie et en identification d'objets, par analyse de détection et segmentation, en méthode objet basé et relief basé.

Parmi les diverses tâches réalisées, j'ai eu la possibilité de participer à des présentations ou formations auprès de propriétaires forestiers, à des cours destinés à des professionnels tant en internes qu'en externes, ainsi qu'à des communications avec des développeurs directement liés à mes projets d'étude. Ces interventions ponctuelles m'ont permis d'améliorer mes compétences ainsi que mes aptitudes en communication et en prise de parole en public. J'ai également bénéficié d'indépendance, de flexibilité et d'autonomie pour déterminer l'approche de mes projets, tout en étant conseillé par mes tuteurs pour livrer un produit exploitable et de bonne qualité.

Je remercie particulièrement mes deux collègues de l'équipe LSD (LiDAR, Satellite, Drone), Michel Chartier et Bastien Peuziat, qui ont toujours été à mes côtés pour me conseiller, répondre à mes questions et me soutenir dans les projets.

Je remercie également Alain Posty, qui m'a encadré comme alternant et m'a donné l'opportunité de faire partie de l'organisation CNPF – IDF pendant cette période d'apprentissage.

7. Bibliographie

- Aati, S., Rupnik, E., & Nejim, S. (2020). Comparative study of photogrammetry software in industrial field. *Revue française de photogrammétrie et de télédétection, 1*(221), 37-48.
- Anderson, K., & Gaston, K. J. (2013). Lightweight unmanned aerial vehicles will revolutionize spatial ecology. *Frontiers in Ecology and the Environment, 11*(3), 138-146.
- Assmann, J. J., Kerby, J. T., Cunliffe, A. M., et al. (2018). Vegetation monitoring using multispectral sensors—best practices and lessons learned from high latitudes. *Journal of Unmanned Vehicle Systems, 7*(1), 54-75.
- Barban, C., Vignais, A., Strickler, M., Miancien, P., & Decourt, V. (2019). Rapport de projet: Parangonnage de suites photogrammétriques. ENSG.
- Barbasiewicz, A., Widerski, T., & Daliga, K. (2018). The analysis of the accuracy of spatial models using photogrammetric software: Agisoft Photoscan and Pix4D. In *E3S Web of Conferences* (Vol. 26, p. 00012). EDP Sciences.
- Centre National de la Propriété Forestière (CNPF). (1998). L'établissement public au service du développement de la gestion durable des forêts privées françaises. In J.-L. Bianco (Ed.), *La Forêt: une chance pour la France. Rapport au Premier ministre* (Vol. 50, No. 6, pp. 493-606). Revue forestière française.
- Centre National de la Propriété Forestière (CNPF). (2024, Avril 11). Le CNPF et la forêt privée - Organisation du CNPF. Extrait de : <https://www.cnpf.fr/le-cnpf-et-la-foret-privee/organisation-du-cnfp/le-centre-national-de-la-propriete-forestiere>
- Centre National de la Propriété Forestière (CNPF-IDF). (2024, Avril 11). L'IDF et la R&D : le service de recherche et développement du CNPF. Extrait de : <https://www.cnpf.fr/le-cnpf-et-la-foret-privee/organisation-du-cnfp/l-idf-et-la-rd-le-service-de-recherche-et>
- Centre National de la Propriété Forestière (CNPF-PSG). (2024, Avril 17). Les documents de gestion durable des forêts privées - PSG. Extrait de : <https://www.cnpf.fr/gestion-durable-des-forets/gestion-durable/les-documents-de-gestion-durable-des-forets-privees-psg>
- Chen, Y., Xu, H., Zhang, X., Gao, P., Xu, Z., & Huang, X. (2023). An object detection method for bayberry trees based on an improved YOLO algorithm. *International Journal of Digital Earth, 16*(1), 781-805.
- Colomina, I., & Molina, P. (2014). Unmanned aerial systems for photogrammetry and remote sensing: A review. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 92*, 79-97.
- Dandois, J. P., Olano, M., & Ellis, E. C. (2015). Optimal altitude, overlap, and weather conditions for computer vision UAV estimates of forest structure. *Remote Sensing, 7*(10), 13895-13920.
- De Luca, G., Silva, J. M. N., Cerasoli, S., et al. (2019). Object-based land cover classification of cork oak woodlands using UAV imagery and Orfeo ToolBox. *Remote Sensing, 11*(10), 1238.
- DJI. (2024, Mars 7). Support produit Mavic 2. Extrait de : <https://www.dji.com/fr/support/product/mavic-2>

Fonstad, M. A., Dietrich, J. T., Courville, B. C., et al. (2013). Topographic structure from motion: a new development in photogrammetric measurement. *Earth Surface Processes and Landforms, 38*(4), 421-430.

Fraser, B. T., & Congalton, R. G. (2018). Issues in Unmanned Aerial Systems (UAS) data collection of complex forest environments. *Remote Sensing, 10*(6), 908.

Gan, Y., Wang, Q., & Iio, A. (2023). Tree crown detection and delineation in a temperate deciduous forest from UAV RGB imagery using deep learning approaches: Effects of spatial resolution and species characteristics. *Remote Sensing, 15*(3), 778.

Girshick, R., Donahue, J., Darrell, T., et al. (2014). Rich feature hierarchies for accurate object detection and semantic segmentation. In *Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition* (pp. 580-587).

Gu, J., Grybas, H., & Congalton, R. G. (2020). A comparison of forest tree crown delineation from unmanned aerial imagery using canopy height models vs. spectral lightness. *Forests, 11*(6), 605.

Heintz, W., Molina, J., Ladet, S., et al. (2024). Évaluation des performances de solutions GNSS Real Time Kinematic commerciales et open source pour la géolocalisation des arbres en forêt.

Iglhaut, J., Cabo, C., Puliti, S., et al. (2019). Structure from motion photogrammetry in forestry: A review. *Current Forestry Reports, 5*, 155-168.

IGN. (2023). LiDAR HD – Version 1.0 – Descriptif de contenu des nuages de points LiDAR – Octobre 2023.

IGN. (2023). Rapport de contrôle qualité – Août 2023. Département 32 (Gers), Août 2023.

INPN. (2024, Avril 10). Biodiversité des territoires français. Extrait de : <https://inpn.mnhn.fr/collTerr/biodiversity/INSEEC31220?tab=area>

Jarahizadeh, S., & Salehi, B. (2024). A Comparative Analysis of UAV Photogrammetric Software Performance for Forest 3D Modeling: A Case Study Using AgiSoft Photoscan, PIX4DMapper, and DJI Terra. *Sensors, 24*(1), 286.

Joyce, K. E., Duce, S., Leahy, S. M., et al. (2018). Principles and practice of acquiring drone-based image data in marine environments. *Marine and Freshwater Research, 70*(7), 952-963.

Kameyama, S., & Sugiura, K. (2021). Effects of differences in structure from motion software on image processing of unmanned aerial vehicle photography and estimation of crown area and tree height in forests. *Remote Sensing, 13*(4), 626.

Météo France. (2024, April 10). Un peu de géographie. Extrait de : <http://pluiesextremes.meteo.fr/france-metropole/Un-peu-de-geographie.html>

OpenDroneMap Authors (ODM). (2024, Mai 7). ODM – Un ensemble d'outils en ligne de commande pour générer des cartes, nuages de points, modèles 3D et MNT à partir d'images de drones, de ballons ou de cerfs-volants. Extrait de : <https://github.com/OpenDroneMap/ODM>

Office National des Forêts (ONF). (2024, Juin 21) Les forêts de nos territoires. Extrait de : <https://www.onf.fr/onf/forets-et-espaces-naturels/%2B20::les-forets-de-nos-territoires.html>.

Over, J. S. R., Ritchie, A. C., Kranenburg, C. J., et al. (2021). Processing coastal imagery with Agisoft Metashape Professional Edition, version 1.6—Structure from motion workflow documentation. *US Geological Survey, 2021*-1039.

Park, J. K., & Lee, K. W. (2021). Drone Image Quality Analysis According to Flight Plan. *Journal of the Korean Society of Surveying, Geodesy, Photogrammetry and Cartography, 39*(2), 81-91.

Patel, S., Chintanadilok, J., Hall-Scharf, B., et al. (2024). WebODM: An Open-Source Alternative to Commercial Image Stitching Software for Uncrewed Aerial Systems: AE593, 2/2024. *EDIS, 1*.

Pell, T., Li, J. Y. Q., & Joyce, K. E. (2022). Demystifying the Differences between Structure-from-Motion Software Packages for Pre-Processing Drone Data. *Drones, 6*(24). Feature Papers of Drones, 2022, 449.

Pouliot, D. A., King, D. J., Bell, F. W., et al. (2002). Automated tree crown detection and delineation in high-resolution digital camera imagery of coniferous forest regeneration. *Remote Sensing of Environment, 82*(2-3), 322-334.

Redweik, P. (2012). Photogrammetry. In *Sciences of Geodesy-II: Innovations and Future Developments* (pp. 133-183). Springer Berlin Heidelberg.

Rupnik, E., Daakir, M., & Pierrot Deseilligny, M. (2017). MicMac—a free, open-source solution for photogrammetry. *Open Geospatial Data, Software and Standards, 2*, 1-9.

Sivanandam, P., & Lucieer, A. (2022). Tree Detection and Species Classification in a Mixed Species Forest Using Unoccupied Aircraft System (UAS) RGB and Multispectral Imagery. *Remote Sensing, 14*(19), 4963.

Tang, L., & Shao, G. (2015). Drone remote sensing for forestry research and practices. *Journal of Forestry Research, 26*, 791-797.

Tinkham, W. T., & Swayze, N. C. (2021). Influence of Agisoft Metashape parameters on UAS structure from motion individual tree detection from canopy height models. *Forests, 12*(2), 250.

Tomaštík, J., Mokroš, M., Surový, P., Grznárová, A., & Merganič, J. (2019). UAV RTK/PPK method—an optimal solution for mapping inaccessible forested areas? Remote Sensing, 11(6), 721.

Vacca, G. (2020). WEB open drone map (WebODM) a software open source to photogrammetry process. In *Fig Working Week 2020. Smart Surveyors for Land and Water Management*.

Weinstein, B. G., Marconi, S., Bohlman, S., et al. (2019). Individual tree-crown detection in RGB imagery using semi-supervised deep learning neural networks. *Remote Sensing, 11*(11), 1309.

Xu, S., Wang, R., Shi, W., & Wang, X. (2023). Classification of tree species in transmission line corridors based on YOLO v7. *Forests, 15*(1), 61.

Gantt - Alternance au CNPF IDF

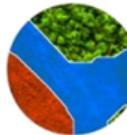
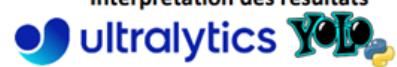
The Gantt chart illustrates the project timeline across four main categories:

- Projet divers**: Includes 'Projets divers' (orange), 'RTK Centipede' (yellow), and 'SPNA Dif. (DepCast)' (light yellow).
- Photogrammetrie**: Includes 'Etude et Tests' (blue) and 'Comparaison Logiciels' (purple).
- Identification**: Includes 'Etude et Tests' (green) and 'Comparaison méthodes' (light green).
- Alternance**: Includes 'Reunions' (red) and 'Rapport etc.' (orange-red).

Vertical grey bars indicate periods of university, holidays, and study breaks.

8.2. Annexe B : Tutoriels

Tutoriels réalisés comme support et résultat du travail effectué pendant la période d'alternance dans l'organisation, comprenant la capture de données RTK, les traitements photogrammétriques et l'identification (détection et segmentation) :

 <p>Acquisition des données RTK de haute précision issues du réseau Centipède</p> 
<p>Tutoriel Agisoft Metashape</p> <p>Traitements photogrammétique</p> 
<p>Tutoriel Pix4D Mapper</p> <p>Traitements photogrammétique</p> 
<p>Tutoriel WebODM</p> <p>Traitements photogrammétique</p> 
<p>Tutoriel YOLO Deepness</p> <p>Segmentation d'arbres</p> 
<p>YOLO - Ultralytics</p> <p>Interprétation des résultats</p> 
<p>Tutoriel DeepForest</p> <p>Détection d'arbres</p>

8.3. Annexe C : Échanges et versions Micmac

Historique Micmac :

Depuis 2005, MicMac a été développé au sein d'un laboratoire de recherche de l'IGN sous la direction de Marc Pierrot-Deseilligny. Initialement conçu comme un programme expérimental pour les agents chargés de produire manuellement les courbes de niveau des cartes à l'échelle 1/25000 de l'IGN, MicMac était destiné à un usage interne et n'était pas doté d'interface graphique ni de documentation détaillée. En conséquence, les noms des modules étaient peu intuitifs. Cependant, la qualité des algorithmes et la précision des résultats étaient primordiales.

Au début des années 2010, MicMac a trouvé des applications plus larges dans les services de l'État pour la modélisation en 3D d'éléments tels que des ponts anciens, des églises, des intérieurs de pyramides et des objets archéologiques, en raison du manque d'outils disponibles et du coût élevé des solutions commerciales. Quelques entreprises, telles que la Compagnie Nationale du Rhône, Vinci et le CNES, ont également adopté MicMac.

Cependant, à partir de l'émergence de Photoscan (devenu Metashape) a commencé à concurrencer MicMac, mettant en lumière ses lacunes et suscitant le développement de plusieurs interfaces graphiques, notamment AperoDeDenis. En raison de ressources limitées, le développement d'AperoDeDenis a été principalement assuré par Denis Jouin de manière part-time, sans équipe dédiée. De plus, la documentation de MicMac reste lacunaire, ce qui constitue un défi majeur.

L'essor des drones et de l'imagerie satellitaire a récemment ravivé l'intérêt pour la photogrammétrie, incitant l'IGN à promouvoir MicMac en développant une version 2. Cette nouvelle version vise à professionnaliser l'application en proposant des noms de modules plus explicites, une documentation exhaustive, une meilleure compatibilité avec les logiciels actuels et la prise en charge de nouvelles fonctionnalités telles que le repérage automatique de cibles codées et le mixage d'images aériennes et satellitaires.

De plus, un projet du consortium 3D Humanum du CNRS vise à intégrer MicMac à l'outil de photogrammétrie Meshroom afin de tirer parti des synergies entre ces deux outils, notamment en ce qui concerne l'interface graphique moderne de Meshroom.

En outre, une nouvelle version de Micmac 2 est en cours de développement par Marc Pierrot-Deseilligny et Ewelina Rupnik via l'IGN, ce qui suggère un potentiel progrès pour l'outil dans un avenir proche : <https://sites.google.com/view/micmacv2-satellite/accueil>.

Échanges avec le développeur :

Échanges par mail entre le 20 mars et le 30 avril, échangeant des fichiers et des études de cas pour résoudre mes problématiques liées au traitement des données de drone, en plus de permettre l'évolution de l'application "Micmac - AperoDeDanis" :

Version 5.78 1 mai 2024

- Nombre de photos non limité
 - Nuages de points en 64 bits : suppression des offset pour les référentiels géographique
 - Rapidité accrue (GPU, recherche des points homologues)
 - Changement de référentiel pour les nuages de points sans recalculer
-

Version 5.77 beta : 16 avril 2024

- Suppression de la complication liée aux offset pour les .ply
-

Version 5.76 beta : 25 mars 2024

- Avec option File pour Tapioca
- Prend en compte la distance GPS entre prises de vue
- But : contourner la limitation à 250 photos maximum