



FAGRESCUE - Traitements 2025 - Données multispectrales

Michel TARBY - michel.tarby@inrae.fr

Dernière MàJ : 17/10/2025 17:34:27

Table des matières

1	Introduction	1
2	Méthodologie	3
2.1	Chaîne de traitement globale	3
2.2	Obtention de positions en RTK/PPK	3
2.3	Traitements dans Metashape	5
2.3.1	Chargement et alignement des images	5
2.3.2	Orthorectification (GCPs), génération de MNS et orthomosaïque . .	7
3	Résultats	8
3.1	Positionnement des GCPs et reconstruction	9
3.1.1	Distance et RMSE en absolu (par rapport aux points RTK)	10
3.1.2	Distance et RMSE en relatif (par rapport aux centroïdes) :	11
3.1.3	Etude de cas : validation croisée du 17/04/2025 et du 29/04/2025 - Z2S2	12
3.1.4	Conditions météorologiques	15
3.2	Corrections radiométriques	16
3.3	Problèmes survenus lors des traitements	19
3.3.1	Duplications dans l'orthomosaïque	19
3.3.2	Artefacts et bruit dans l'orthomosaïque	19
3.3.3	Dysfonctionnement du capteur multispectral et du capteur de lumière	21
4	Conclusion	22

Table des figures

1	Dates des vols réalisés selon les différents scénarios de vol sur les deux zones retenues.	2
2	Chaine de traitement globale utilisée dans le cadre de la création des orthomosaïques multispectrales.	3
3	Schéma récapitulatif de la récupération et du traitement en PPK.	5
4	Capture d'écran de Metashape lors de la sélection des images à supprimer (en orange).	6
5	Exemple d'orthomosaïque multispectrale - vol du 25/04/2025 - scénario 2 (4cm/px).	9
6	Répartition des distances des GCP sur les orthomosaïques par rapport aux points relevés sur le terrain en RTK.	11
7	RMSE des distances à chaque GCP pour chaque jeu de données de vérité-terrain (par date).	12
8	Dispersion des mires autour du centroïde pour chaque mire (en distance).	13
9	Comparaison de la distance des GCPs pour différentes configurations d'orthomosaïques (17/04/2025 et 29/04/2025 - zone 2 - scénario 2). Les groupes <i>GCP_XX</i> correspondent aux orthomosaïques produites avec uniquement le GCP indiqué et validé avec les 3 autres GCPs. Le groupe <i>NON</i> correspond à l'orthomosaïque produite sans GCP et sans PPK, le groupe <i>PPK_SEULEMENT</i> correspond à l'orthomosaïque produite avec PPK mais sans GCP et enfin <i>OUI</i> correspond à l'orthomosaïque où les points 3, 9 et 10 ont été utilisés pour l'optimisation.	14
10	Matrice de validation-croisée pour chaque GCP sur l'orthomosaïque du 17/04/2025 et du 29/04/2025 (zone 2 - scénario 2).	15
11	Vitesse du vent (m/s) et rafales (m/s) enregistrées par les stations de Rouen (haut) et Beauvais (bas) durant le mois d'avril 2025.	16
12	Valeur moyenne de réflectance dans le NIR au centre des linoléums en fonction de la méthode de calibration radiométrique utilisée.	17
13	Irradiance relevée par le DLS pour chaque longueur d'onde durant le vol du 29/04/2025 (zone 2 - scénario 2). Le dernier point correspond également à la capture du spectralon.	17
14	Distribution des valeurs de pixels bruts (DN) pour chaque bande de l'orthomosaïque du 29/04/2025 (zone 2 - scénario 2).	18
15	Exemple de duplication d'arbres dans l'orthomosaïque du 22/04/2025 (zone 1) avant (gauche) et après (droite) correction.	19
16	Comparaison d'une orthomosaïque produite via le MNS de Metashape (haut gauche), le MESH Metashape (haut droite) et le MNS LIDAR (bas gauche) avec une orthomosaïque produite le 14/04/2025 (bas droite).	20
17	Evolution du BBCH en fonction de la date et du dispositif expérimental.	21

Liste des tableaux

1	Paramètres de vol et résolutions associés aux scénarios	1
2	Fichiers récupérés et générés pour le traitement PPK	4
3	Liste de GCPs utilisés en orthorectification et validation. Les points 2, 4 et 6 (zone 2) n'ont pas été utilisés car absents des orthomosaïques produites.	7

4	Synthèse de la production des orthomosaïques et traitements PPK.	10
---	--	----

1 Introduction

Ce document présente les traitements effectués durant l'été 2025 dans le cadre du projet **FAGRESCUE**. Il détaille la chaîne de traitement utilisée, les outils mobilisés, ainsi que les résultats et problèmes obtenus. Pour rappel, le projet FAGRESCUE vise à **caractériser la phénologie des hêtraies via des données multispectrales acquises par drone lors du débourrement**.

Dans ce contexte, la forêt domaniale de **Lyons-la-Forêt (76)** a été retenue car présentant un peuplement de hêtres d'origines diverses, **planté en 1995 par l'INRAE**. La densité importante de ce peuplement - un mètre d'écart entre individus sur la même rangée et deux mètres d'espacement entre lesdites rangées - a poussé à **choisir une seconde zone d'étude**, située à proximité immédiate de la forêt domaniale de Lyons-la-Forêt, dans une parcelle privée gérée par l'ONF et présentant un peuplement de **hêtres plus clairsemé**.

Pour le survol de ces deux zones, un drone **DJI Matrice 350 RTK** équipé d'une nacelle double embarquant un capteur multispectral **MicaSense RedEdge-MX Dual** et un capteur LIDAR/RGB **DJI Zenmuse L2** a été utilisé. Cet équipement a été mobilisé systématiquement **3 à 4 fois par semaines entre le 07 avril 2025 et le 01 mai 2025** sur les deux zones d'étude, selon 4 scénarios de vol différents (Table 1).

Scénario	Résolution MS (cm/px)	Densité de points (pts/m ²)	Altitude (m)	Vitesse (m/s)
1	2	20 536	43.8	1.3
2	4	12 389	72.6	1.3
3	8	5 766	120	1.3

TABLE 1 – Paramètres de vol et résolutions associés aux scénarios

Du **01 au 07 avril**, plusieurs vols ont été effectués pour tenter d'obtenir une image au temps 0, i.e. quand aucun individu n'avait commencé son débourrement. 83 vols ont été réalisés durant toute la période, tout scénarios confondus (Figure 1). Cependant, seuls les vols réalisés selon le **scénario 2** (29 vols) ont été traités durant l'été 2025 et seront donc présentés dans ce document.

Enfin, bien que le capteur LIDAR ait été embarqué conjointement avec le capteur multispectral, **seuls les traitements des données multispectrales seront détaillés dans ce rapport**, le traitement des données LIDAR étant prévu pour l'automne 2025.

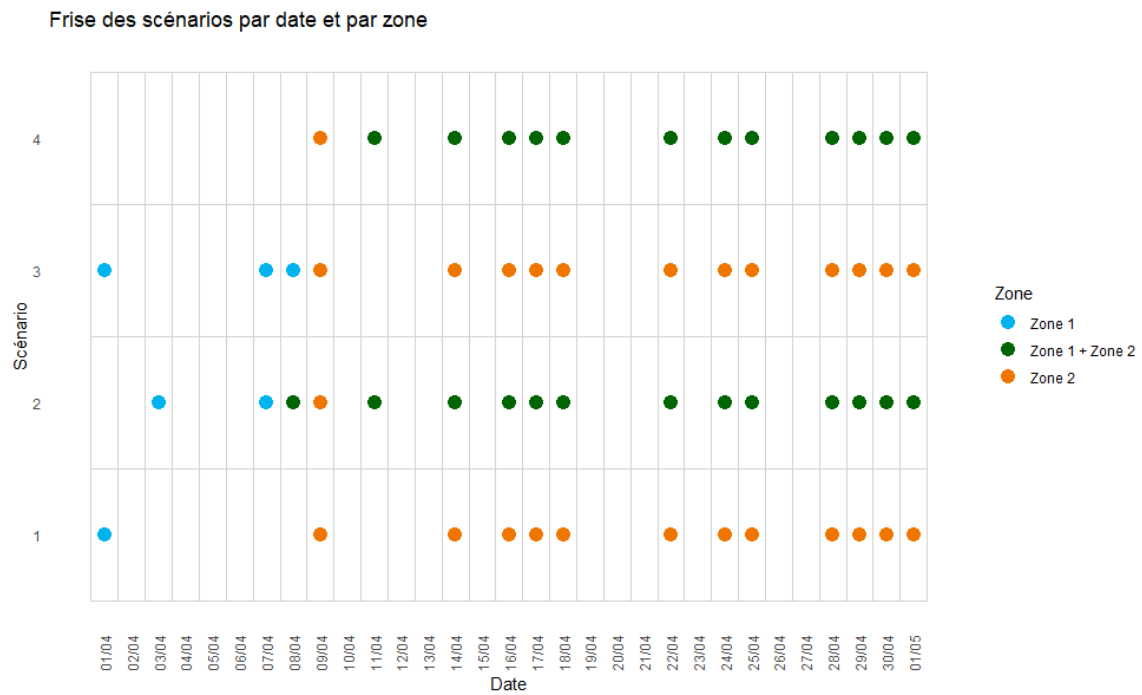


FIGURE 1 – Dates des vols réalisés selon les différents scénarios de vol sur les deux zones retenues.

2 Méthodologie

2.1 Chaîne de traitement globale

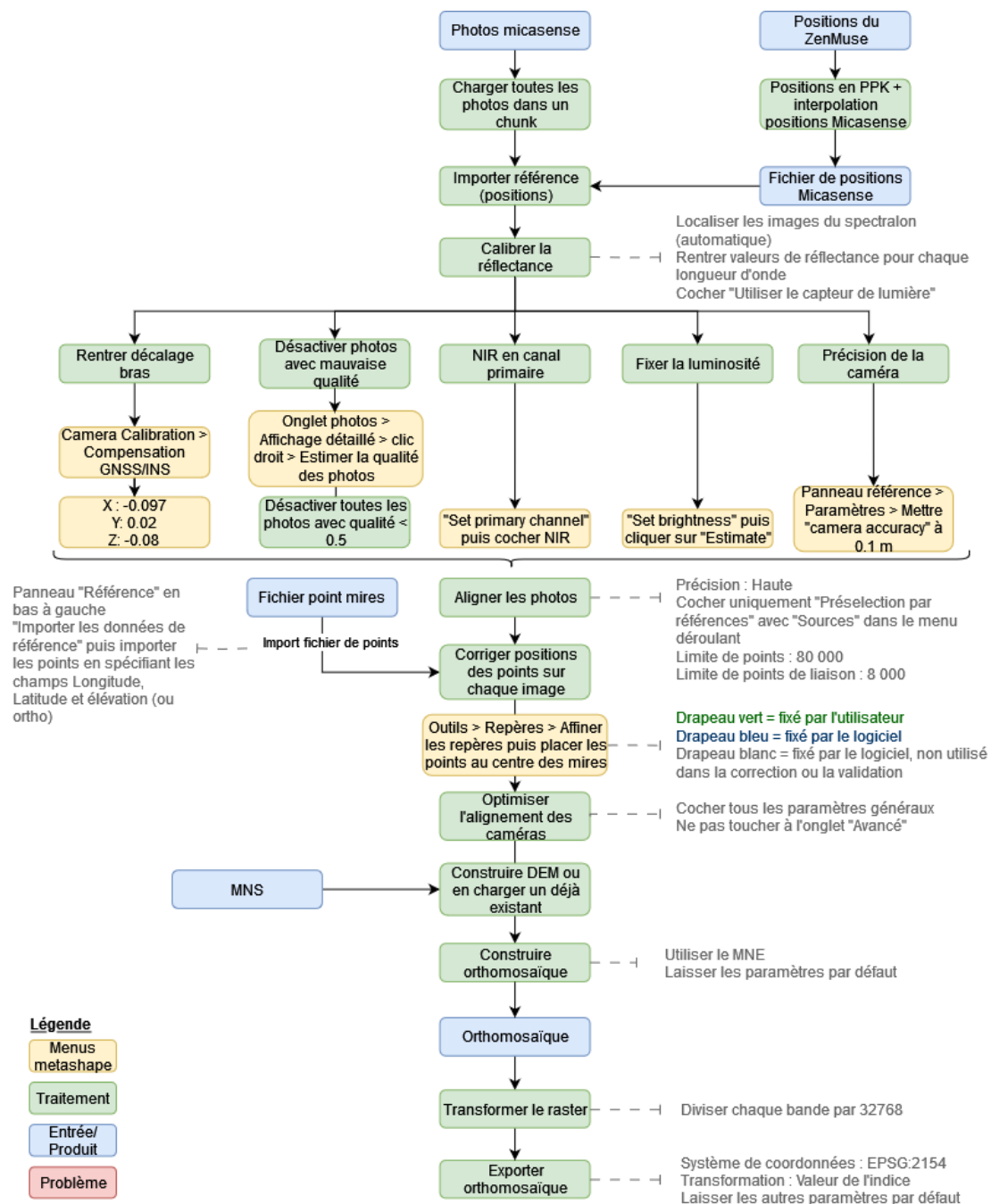


FIGURE 2 – Chaîne de traitement globale utilisée dans le cadre de la création des orthomosaïques multispectrales.

2.2 Obtention de positions en RTK/PPK

Afin de garantir une position centimétrique des images issues du capteur multispectral, **un traitement PPK a été effectué**. Pour ce faire, il a été nécessaire, pour chaque date, de récupérer **les données GNSS brutes du drone ainsi que celles d'une base**

proche.

Ces données sont au format **RINEX** et peuvent se présenter sous différents formats : dans le cas présent, il s'agit de **fichiers d'observations** (.25O, .obs ...) ainsi que de **fichiers de navigation** (.25N, .nav...).

Afin de produire un RINEX pour chaque mission, le fichier .RTK (format propriétaire DJI) présent dans tous les dossiers créés lors des vols avec le DJI ZenMuse L2 a été **récupéré puis renommé au format .rtcm3 (protocole d'échange GNSS des données de correction)**. Par la suite, ce fichier a été **converti en fichier d'observation .25O** en utilisant Emlid Studio.

Pour la base, les fichiers RINEX ont été récupérés auprès du **réseau RGP de l'IGN (station ANDR)**, au format 2.11 avec un échantillonnage d'une seconde, incluant les constellations **GPS et GLONASS**. Lorsque ces données ne permettaient pas d'obtenir une solution en FIX, celles de la **station MOMO du réseau CentipedeRTK**, également exploitée en RTK lors de la mission, ont été utilisées. Les deux stations sont situées à respectivement **15,8 km et 16,6 km** de la zone d'étude.

A l'issue du téléchargement de ces données, un fichier d'observation ainsi qu'un fichier de navigation pour chaque date ont été obtenus (Table 2).

Type	Source	Format
GNSS brut drone	Drone DJI (ZenMuse L2)	.RTK / .rtcm3
Observation drone	Conversion du .rtcm3 via Emlid Studio	.25O
Observation base	RGP IGN / CentipedeRTK	.25O
Navigation base	RGP IGN / CentipedeRTK	.25N

TABLE 2 – Fichiers récupérés et générés pour le traitement PPK

Enfin, les logiciels Emlid Studio et RTKlib ont été utilisés afin de traiter en PPK ces données. Afin d'obtenir une position en FIX et ainsi garantir la meilleure précision possible, les paramètres utilisés ont été les suivants :

```
Positioning mode : Kinematic
Frequencies : L1+L2
Filter Type : Combined
Elevation Mask : Variable
SNR Mask : 35° pour L1 et L2
Ionosphere correction : Broadcast
Troposphere correction : Saastamoinen
Satellite ephemeris : Broadcast
Integer Ambiguity resolution : Fix and Hold
```

L'elevation mask, i.e. l'angle par rapport à l'horizon à partir duquel les satellites ont été pris en compte lors de la correction, a été changé pour chaque traitement **afin d'obtenir une position en FIX**. Au final, sur les 83 vols, un seul n'a pas pu être traité en PPK, aucune solution en FIX ne pouvant être trouvée (vol scénario 2 zone 2 - 11/04/2025). A l'issue de ces traitements, **un fichier .pos contenant toutes les positions du drone au centimètre près a été obtenu**. Un schéma récapitulatif de la récupération et du traitement en PPK est présenté en Figure 3.

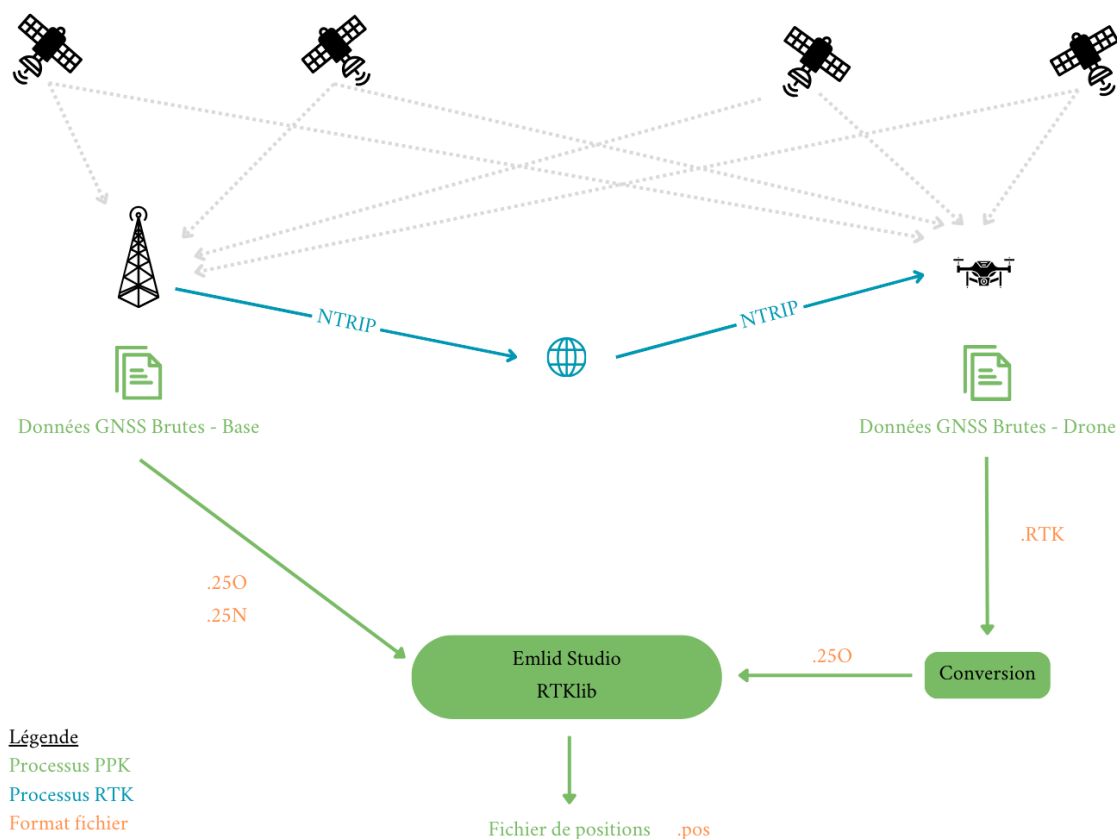


FIGURE 3 – Schéma récapitulatif de la récupération et du traitement en PPK.

Une imputation des positions de chaque image multispectrale a été réalisée à partir du fichier .pos via un script Python adapté du TERN (SIVANANDAM et al. 2023) disponible sur GitHub¹.

Ce script compare initialement l’horodatage des images multispectrales (EXIF) avec celui du fichier .MRK issu du capteur ZenMuse P1. Cependant, ce fichier .MRK ne contient des données de position que lors des captures du capteur RGB, ce qui peut entraîner des écarts de **plusieurs dizaines de secondes entre les positions**.

Pour améliorer la précision, le script a été modifié afin d’utiliser le fichier .pos produit précédemment, qui fournit des positions à l’échelle de la subseconde. Le script extrait alors la date et l’heure de chaque image à partir des métadonnées EXIF, puis recherche la position correspondante dans le fichier .pos. Les coordonnées obtenues sont ensuite **reprojetées en Lambert-93 (EPSG :2154)** et stockées dans un fichier CSV.

2.3 Traitements dans Metashape

2.3.1 Chargement et alignement des images

Pour chaque date de vol, **un projet distinct a été créé dans Metashape**. L’ensemble des images multispectrales a été importé en sélectionnant le dossier contenant toutes les bandes. Cette méthode permet à Metashape d’**identifier automatiquement qu’il s’agit d’un capteur multispectral et d’organiser les images en conséquence**.

1. https://github.com/ternaustralia/drone_metashape

Le fichier csv contenant les positions PPK a ensuite été importé dans Metashape et les **coordonnées des images ont été mises à jour** en utilisant les informations de position en Lambert-93 contenues dans le fichier. Chaque scénario de vol a été placé dans un *chunk* distinct afin de faciliter la gestion des données.

Le capteur multispectral ayant été embarqué conjointement avec le capteur DJI Zenmuse L2, des images inutiles capturées durant les phases de calibrations de ce dernier (allers-retours du drone) ont été supprimées manuellement (Figure 4). De plus, le panneau de calibration ayant été capturé plusieurs fois pour chaque date, **seules les images de calibration capturées juste avant et juste après le vol ont été conservées pour chaque scénario**.

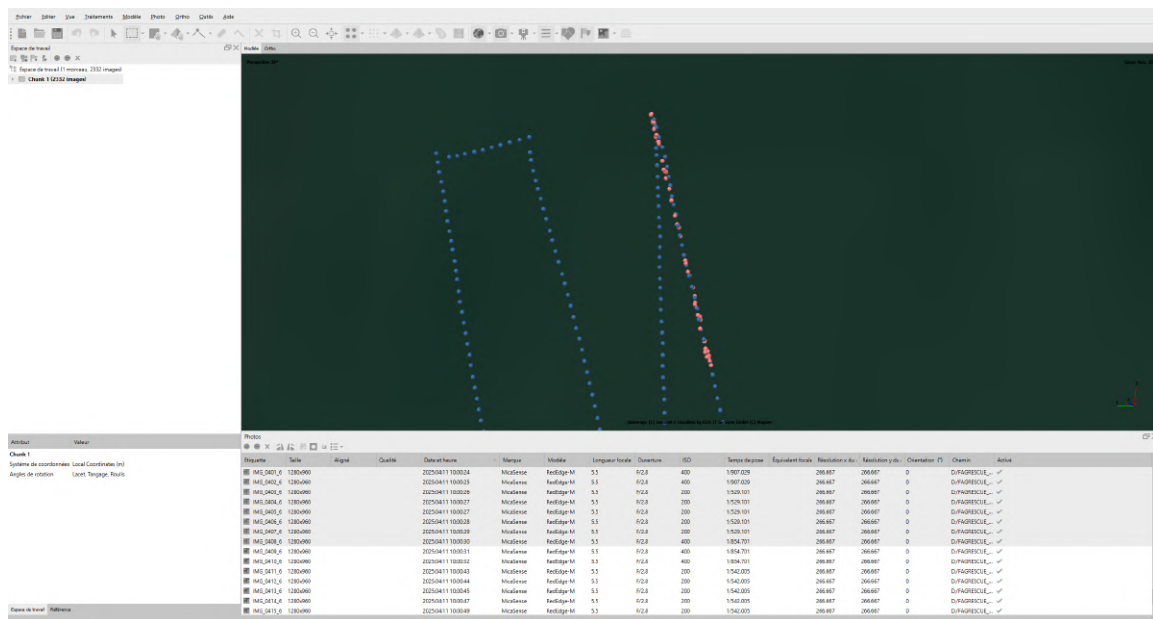


FIGURE 4 – Capture d'écran de Metashape lors de la sélection des images à supprimer (en orange).

Une fois les images chargées, les positions rentrées et les images triées, les paramètres suivants ont été utilisés avant le début des traitements :

- sélectionner le canal primaire : **NIR** (Near Infrared) ;
- estimer la luminosité des images ;
- rentrer le décalage du bras de la double nacelle (offset) : **X : -0.097m, Y : 0.02m, Z : -0.08m** ;
- désactiver toutes les images dont la qualité est inférieure à **0.5** (qualité estimée par Metashape) ;
- changer la précision de la caméra : **0.1m** ;
- calibrer la réflectance : **localiser panneaux de réflectance** et **utiliser le capteur de lumière**.

Le paramétrage nécessaire ayant été effectué, **l'alignement des images** a été lancé en utilisant les paramètres suivants :

- précision : **haute** ;
- préselection par référence : **sources** ;

- limite de points : **80000** ;
- limite de points de liaison : **8000**.

2.3.2 Orthorectification (GCPs), génération de MNS et orthomosaïque

L'alignement des images ayant été effectué, il a été possible de corriger la position estimée des caméras via des GCPs (Ground Control Points). **Les GCPs ont été importés dans Metashape via un fichier csv contenant leurs coordonnées en Lambert-93**, obtenues lors de la campagne terrain en relevant le centre de mires via un rover avec position corrigée en RTK.

Chaque GCP a ensuite été localisé manuellement sur les images puis les positions des caméras ont été optimisées via la fonction **Optimiser la caméra** de Metashape.

Lors de cette phase d'optimisation, certaines cibles n'ont pas été utilisées et ont donc servi de **cibles de validation**. Ces dernières ont été retenues car présentant des **erreurs de positionnement élevées**, pouvant ainsi avoir un impact sur l'alignement des orthomosaïques entre plusieurs dates. Ces GCP sont présentés en Table 3.

n° GCP	Zone	Orthorectification/Validation	Date relevé du point
10	1	Orthorectification	24/04/2025
5	1	Orthorectification	24/04/2025
7	1	Validation	24/04/2025
1	1	Validation	07/04/2025
3	2	Orthorectification	24/04/2025
9	2	Orthorectification	24/04/2025
8	2	Validation	24/04/2025

TABLE 3 – Liste de GCPs utilisés en orthorectification et validation. Les points 2, 4 et 6 (zone 2) n'ont pas été utilisés car absents des orthomosaïques produites.

Aussi, **plusieurs points ont été relevés** pour chaque mire à des dates différentes et ont donc également été utilisés comme points de validation. À noter que, en raison de dysfonctionnements du rover RTK sur le terrain (connexion en RTK Fix impossible), **toutes les cibles n'ont pas pu être systématiquement relevées**.

Une fois cette étape d'orthorectification terminée, **le MNS (Modèle Numérique de Surface) a été généré** en utilisant les paramètres suivants :

- données sources : **cartes de profondeur** ;
- qualité : **ultra haute** ;
- interpolation : **activée** ;
- filtrage de la profondeur : **agressif**.

Le MNS produit a par la suite été utilisé pour **produire l'orthomosaïque** :

- type de surface : **MNS** ;
- mode de fusion : **mosaïque** ;
- activer le remplissage des trous : **activé**.

Les données provenant du capteur multispectral étant en Uint16, **la valeur maximale possible est de 65535 et correspond à 200% de réflectance après calibration**

radiométrique d'après le constructeur². Ainsi, pour chaque bande, l'orthomosaïque a été divisée par **32768** via la fonction **transformation raster** de Metashape afin d'obtenir une réflectance variant entre 0 et 1 (Float32).

Enfin, l'orthomosaïque a été exportée au format GeoTIFF en conservant les paramètres par défaut, avec la transformation raster définie sur « **valeur de l'indice** ». Chaque résultat a ensuite été enregistré dans un dossier propre à la date de vol, les bandes étant organisées selon la répartition suivante dans le produit final :

- **bande 1** : Bleu - 444 (28) nm ;
- **bande 2** : Bleu - 475 (32) nm ;
- **bande 3** : Vert - 531 (14) nm ;
- **bande 4** : Vert - 560 (27) nm ;
- **bande 5** : Rouge - 650 (16) nm ;
- **bande 6** : Rouge - 668 (14) nm ;
- **bande 7** : Red-Edge - 705 (10) nm ;
- **bande 8** : Red-Edge - 717 (12) nm ;
- **bande 9** : Red-Edge - 740 (18) nm ;
- **bande 10** : NIR - 842 (57) nm.

3 Résultats

Sur les 29 vols réalisés selon le scénario 2, **27 orthomosaïques multispectrales ont été produites**. Un exemple d'orthomosaïque est présenté en Figure 5.

2. <https://tinyurl.com/y76dzbdm>

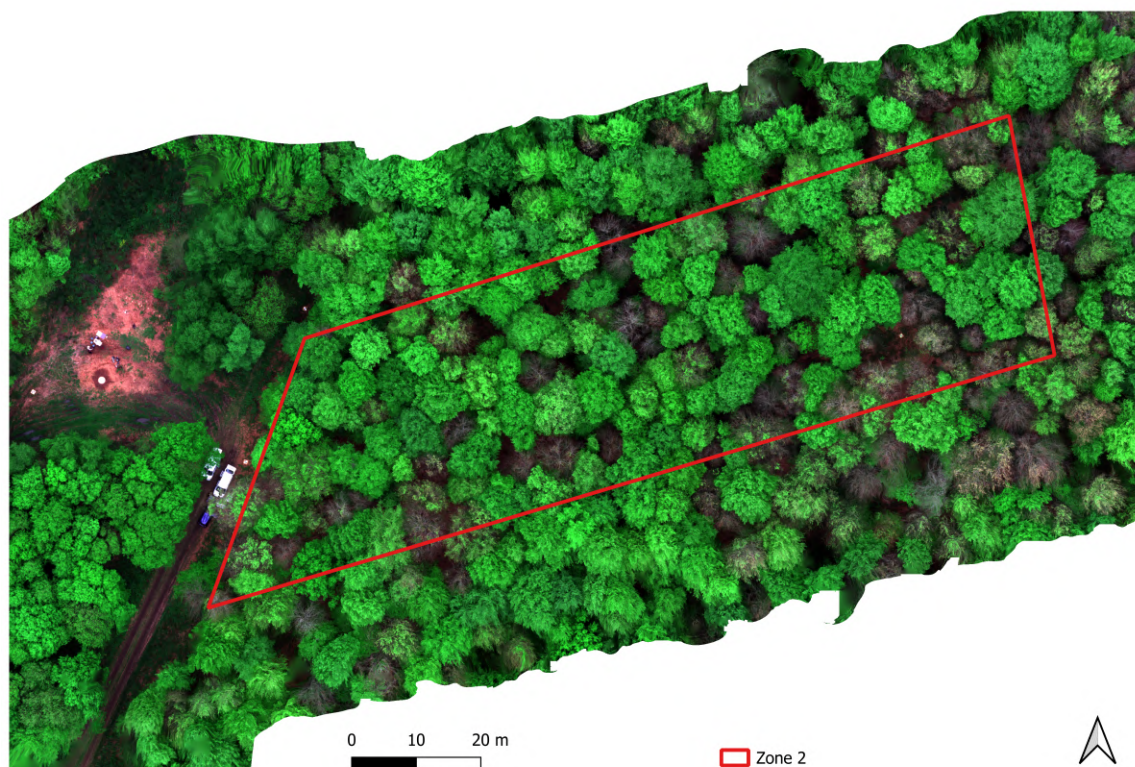


FIGURE 5 – Exemple d’orthomosaïque multispectrale - vol du 25/04/2025 - scénario 2 (4cm/px).

Les deux vols n’ayant pas pu être traités sont ceux du **07/04/2025 (zone 1)** et du **18/04/2025 (zone 1)**. Le premier n’a pas pu être traité en raison d’un dysfonctionnement caméra, la majorité des images étant manquantes. Le second a présenté des problèmes lors de l’alignement des images, une partie n’ayant pas pu être alignée correctement, probablement en raison de manques de points de liaison.

De plus, les fichiers des vols du **03/04/2025 et du 16/04/2025** ont présenté un problème lors de la copie du capteur et seules 5 bandes sur 10 ont été récupérées et traitées. Les bandes des orthomosaïques produites sont les suivantes :

- **bande 1** : Bleu - 475 nm ;
- **bande 2** : Vert - 560 nm ;
- **bande 3** : Rouge - 668 nm ;
- **bande 4** : Red-Edge - 717 nm ;
- **bande 5** : NIR - 842 nm.

Enfin, les vols du **08/04/2025 et du 11/04/2025 (zone 2)** ont également présenté des difficultés, liées respectivement à l’absence de mires au sol et à l’impossibilité d’obtenir une solution PPK. Ils ont donc été traités, le premier sans GCPs mais avec des positions PPK, et le second sans positions PPK mais avec une orthorectification basée sur les GCPs. Un résumé des vols et des orthomosaïques produites est présenté en Table 4.

3.1 Positionnement des GCPs et reconstruction

Après la production des orthomosaïques, la position de chaque mire a été obtenue par photointerprétation, puis comparée aux coordonnées acquises en RTK. Cette comparaison

Date	Zone	Ortho	Réseau PPK	Base	Logiciel	Remarques
03/04/2025	1	✓	RGP (IGN)	momo	Emlid Studio	5 bandes manquantes
07/04/2025	1	✗	RGP (IGN)	momo	Emlid Studio	Données manquantes
08/04/2025	1	✓	RGP (IGN)	momo	Emlid Studio	
08/04/2025	2	✓	RGP (IGN)	momo	RTKlib	Pas de mires au sol
09/04/2025	2	✓	RGP (IGN)	momo	RTKlib	
11/04/2025	1	✓	RGP (IGN)	momo	RTKlib	
11/04/2025	2	✓				PPK Impossible
14/04/2025	1	✓	RGP (IGN)	momo	Emlid Studio	
14/04/2025	2	✓	RGP (IGN)	momo	Emlid Studio	
16/04/2025	1	✓	RGP (IGN)	momo	Emlid Studio	5 bandes manquantes
16/04/2025	2	✓	RGP (IGN)	momo	Emlid Studio	5 bandes manquantes
17/04/2025	1	✓	RGP (IGN)	momo	Emlid Studio	
17/04/2025	2	✓	RGP (IGN)	momo	Emlid Studio	
18/04/2025	1	✗	RGP (IGN)	momo	Emlid Studio	Problème d'alignement
18/04/2025	2	✓	RGP (IGN)	momo	Emlid Studio	
22/04/2025	1	✓	RGP (IGN)	momo	RTKlib	
22/04/2025	2	✓	CentipèdeRTK	ANDR	RTKlib	
24/04/2025	1	✓	RGP (IGN)	momo	Emlid Studio	
24/04/2025	2	✓	RGP (IGN)	momo	Emlid Studio	
25/04/2025	1	✓	RGP (IGN)	momo	Emlid Studio	
25/04/2025	2	✓	RGP (IGN)	momo	Emlid Studio	
28/04/2025	1	✓	RGP (IGN)	momo	Emlid Studio	
28/04/2025	2	✓	RGP (IGN)	momo	Emlid Studio	
29/04/2025	1	✓	RGP (IGN)	momo	Emlid Studio	
29/04/2025	2	✓	RGP (IGN)	momo	Emlid Studio	
30/04/2025	1	✓	CentipèdeRTK	ANDR	RTKlib	
30/04/2025	2	✓	RGP (IGN)	momo	Emlid Studio	
01/05/2025	1	✓	RGP (IGN)	momo	RTKlib	
01/05/2025	2	✓	CentipèdeRTK	ANDR	Emlid Studio	

TABLE 4 – Synthèse de la production des orthomosaïques et traitements PPK.

a permis de calculer les distances entre les deux jeux de points. En complément, afin d'évaluer la cohérence relative des orthomosaïques au sein de la série temporelle, un centroïde a été calculé pour chaque mire à partir de l'ensemble des positions photointerprétées. La dispersion de ces positions autour du centroïde a ensuite été mesurée. À partir de ces distances, plusieurs indicateurs ont été dérivés : le RMSE par mire, le RMSE pour chaque date de collecte RTK, le RMSE associé à chaque orthomosaïque, ainsi que le RMSE de la dispersion des positions autour des centroïdes.

3.1.1 Distance et RMSE en absolu (par rapport aux points RTK)

Les mires situées en forêt présentent des distances aux points RTK significativement plus élevées que celles placées en milieu ouvert. Le test de Kruskal-Wallis ($p < 0,001$), suivi des comparaisons post-hoc de Dunn avec correction de Bonferroni, confirme l'existence de différences significatives entre mires. Celles-ci se regroupent en plusieurs ensembles statistiques distincts (Figure 6).

Les mires 3, 9 et 10 forment un premier groupe caractérisé par les RMSE les plus faibles (0.08, 0.048 et 0.133 m respectivement). Ces GCP se trouvent en bordure de forêt (mire 3 et 9) ou en zone ouverte, à proximité de l'aire d'envol du drone (mire 10).

La mire 5 se distingue par une forte variabilité. Elle ne diffère significativement que de la mire 7, et présente une médiane basse (0.0917 m) mais un écart-type très élevé (0.975), résultant de valeurs extrêmes (RMSE global = 1.246). Située en forêt dans la zone 1, elle est localisée à proximité du GCP 10.

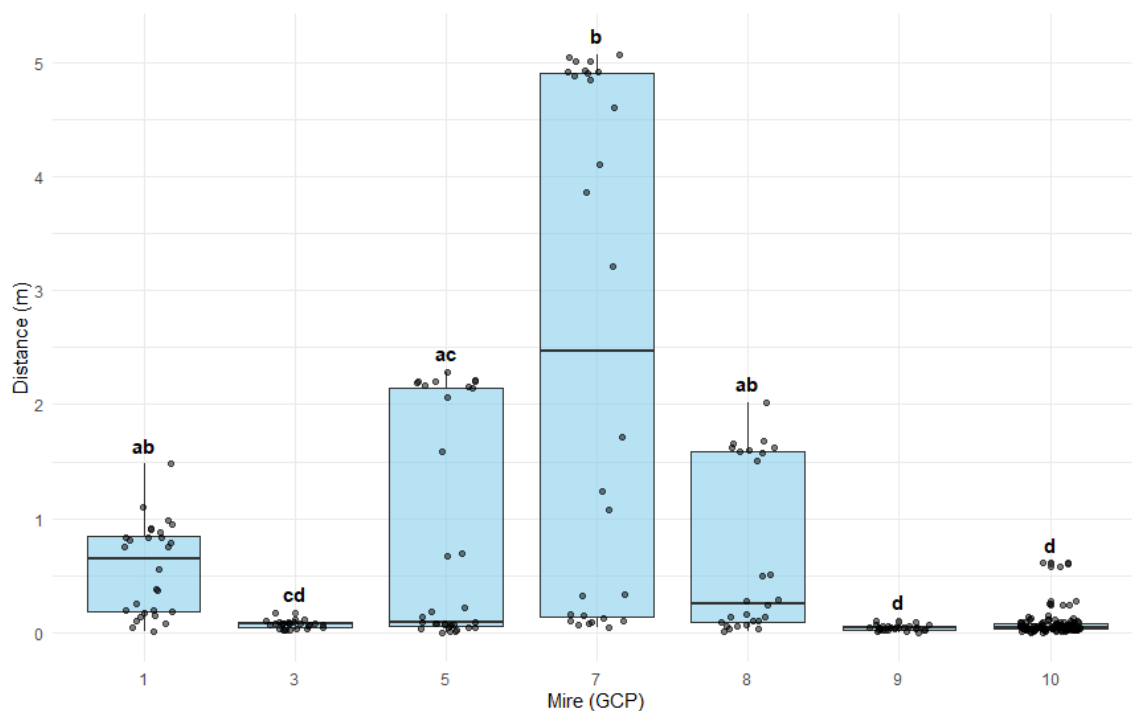


FIGURE 6 – Répartition des distances des GCP sur les orthomosaïques par rapport aux points relevés sur le terrain en RTK.

Un dernier ensemble est formé par les mires 1, 7 et 8, qui affichent des erreurs nettement plus importantes ($RMSE = 0.682, 3.349$ et 0.991 m). Ces fortes valeurs, liées à des médianes et des dispersions élevées, concernent les cibles les plus éloignées et situées en milieu forestier, dans la zone 1 (mire 1 et 7) et la zone 2 (mire 8).

Il est à noter que l’optimisation des caméras dans Metashape a été réalisée à partir des GCP 3, 5, 9 et 10, ce qui pourrait partiellement expliquer leur meilleure précision. Cependant, comme cette optimisation s’appuie sur les points relevés en RTK le 24/04/2025, la comparaison avec d’autres dates de collecte reste valable. La forte variabilité observée pour certaines mires en forêt semble davantage liée à l’incertitude de la mesure RTK. Par exemple, le GCP 7 présente un $RMSE$ de 1.23 m pour le point collecté le 30/04/2025, contre 4.57 m pour celui du 24/04/2025. Comme ce GCP n’a pas servi à l’optimisation, cette différence — également observée pour les mires 1, 5 et 8 — est probablement imputable à la précision fluctuante du rover RTK (Figure 7).

3.1.2 Distance et RMSE en relatif (par rapport aux centroïdes) :

Dans le cadre de ce projet, l’alignement relatif des images revêt une importance majeure, tandis que leur précision absolue (i.e. leur projection exacte sur la surface terrestre) est moins critique. Comme évoqué précédemment, une grande partie de la variabilité observée provient de l’incertitude associée aux points relevés en RTK. En s’affranchissant de cette référence absolue et en considérant uniquement la dispersion des points dans un repère relatif, il est possible de mieux évaluer la cohérence interne des orthomosaïques.

Dans ce contexte, les distances aux centroïdes varient généralement entre 0.02 et 0.6 m, à l’exception de deux valeurs extrêmes avoisinant 1.5 m (Figure 8).

L’analyse statistique distingue principalement deux groupes : les GCP 1, 7 et 8 présentent des médianes comprises entre 0.150 et 0.559 m, ainsi que des écarts-types de

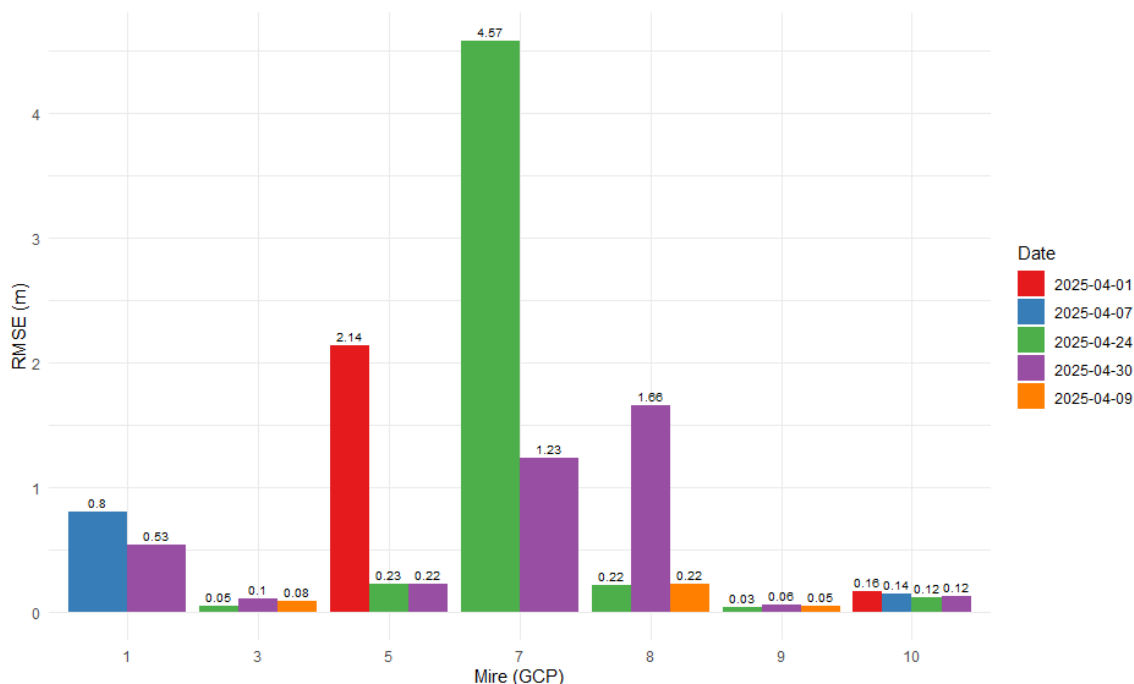


FIGURE 7 – RMSE des distances à chaque GCP pour chaque jeu de données de vérité-terrain (par date).

0.125 à 0.193 m, significativement supérieurs à ceux des autres cibles. Les RMSE suivent également cette tendance.

Ces GCP sont tous situés sous un couvert forestier dense. Contrairement aux distances absolues, cette variabilité ne peut pas être attribuée aux incertitudes liées au RTK, puisqu'elle repose uniquement sur les positions relatives. Elle semble davantage liée aux conditions de reconstruction sur le MNS. En effet, les GCP les plus affectés se trouvent au cœur des peuplements forestiers et en bordure de la zone de vol, où le recouvrement par les caméras est plus faible. Dans ces secteurs, la génération du MNS puis la projection des images sont plus susceptibles d'introduire des erreurs au sol. Celles-ci peuvent décaler les GCP projetés, sans pour autant affecter de manière équivalente le haut de la canopée (18 à 25 m au-dessus), faute de points de contrôle disponibles à cette hauteur pour le vérifier.

Le second groupe est quant à lui constitué des GCP 3, 9 et 10 — le GCP 5 n'étant pas significativement différent de tous les autres GCP. Ici, les médianes sont comprises entre 0.017m et 0.027m, les écarts-types entre 0.026 et 0.103 et les RMSE entre 0.035 et 0.115. Leur utilisation lors de la phase d'optimisation est très probablement la cause principale de cette faible dispersion, démontrant l'utilité de cette dernière lors de la création des orthomosaïques. Afin de mitiger cet effet, une validation croisée a été réalisée, comme détaillé dans la section suivante.

3.1.3 Etude de cas : validation croisée du 17/04/2025 et du 29/04/2025 - Z2S2

Afin d'étudier plus en détail les erreurs de positionnement des GCPs, une validation croisée a été réalisée sur les orthomosaïques du 17/04/2025 et du 29/04/2025 (zone 2, scénario 2). Pour ce faire, chaque GCP a été utilisé individuellement pour produire une orthomosaïque, puis la distance entre la position photointerprétée et la position RTK des GCPs non utilisés a été calculée. Deux orthomosaïques supplémentaires ont également été

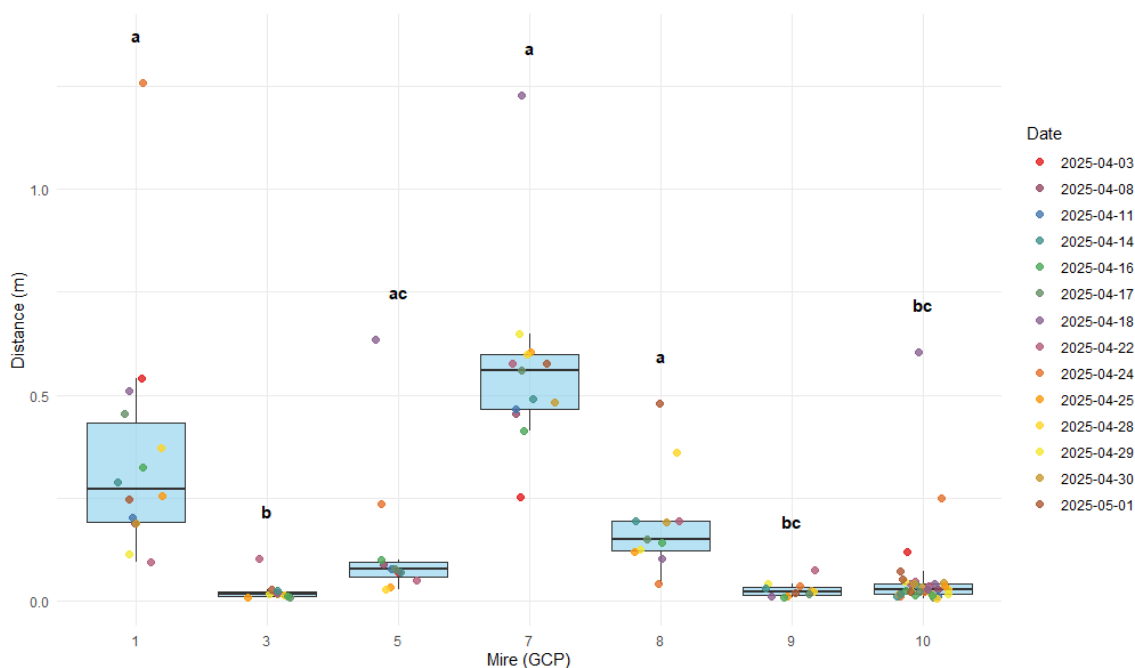


FIGURE 8 – Dispersion des mires autour du centroïde pour chaque mire (en distance).

produites : l'une sans aucun GCP et sans position en PPK et l'autre avec une position en PPK mais sans utilisation des GCPs. Enfin, l'orthomosaïque produite avec les GCPs 3, 9 et 10 a également été prise en compte pour comparaison. L'ensemble des distances est présenté en Figure 9.

Dans la suite de ce paragraphe, les résultats sont présentés comme la moyenne des deux dates de vol. Les orthomosaïques produites sans points de contrôle au sol (GCP) ni positionnement PPK présentent les plus fortes erreurs, avec un RMSE moyen de 2,16 m. L'intégration d'au moins un GCP permet une amélioration systématique de la précision, avec des RMSE compris entre 0,368 m et 0,419 m pour les GCP 3, 9 et 10, et un RMSE plus élevé de 0,918 m pour le GCP 8. L'utilisation du PPK seul conduit à une précision comparable (RMSE = 0,465 m), tandis que la combinaison du PPK avec les GCP 3, 9 et 10 permet d'atteindre une précision nettement supérieure (RMSE = 0,083 m).

Le test de Kruskal–Wallis ($p < 0,001$), suivi de comparaisons post-hoc de Dunn avec correction de Bonferroni, révèle plusieurs différences significatives entre les configurations testées. Les orthomosaïques produites avec PPK et GCP se distinguent significativement de celles obtenues sans GCP ni PPK, avec le PPK seul ou avec le seul GCP 8. De plus, les orthomosaïques générées avec le GCP 8 seul diffèrent significativement de celles produites avec les GCP 3, 9 ou 10 seuls, ou avec le PPK seul. En revanche, aucune différence significative n'a été observée entre les GCP 3, 9 et 10, entre ces derniers et le PPK seul, ni entre le PPK combiné aux GCP et ces différentes configurations. Le GCP 8 est par ailleurs la seule configuration qui ne se distingue pas significativement de l'orthomosaïque produite sans GCP ni PPK, tout en différant de celle obtenue avec PPK et GCP combinés.

L'analyse détaillée de la précision de chaque GCP de validation en fonction des orthomosaïques produites (Figure 10) met en évidence des contrastes notables selon leur localisation.

Le GCP 8, situé en milieu forestier, présente systématiquement les plus fortes erreurs de positionnement, aussi bien lorsqu'il est utilisé pour l'optimisation (précision comprise entre 0,84 m et 1,073 m) que pour la validation (entre 0,499 m et 0,607 m). À l'inverse, les

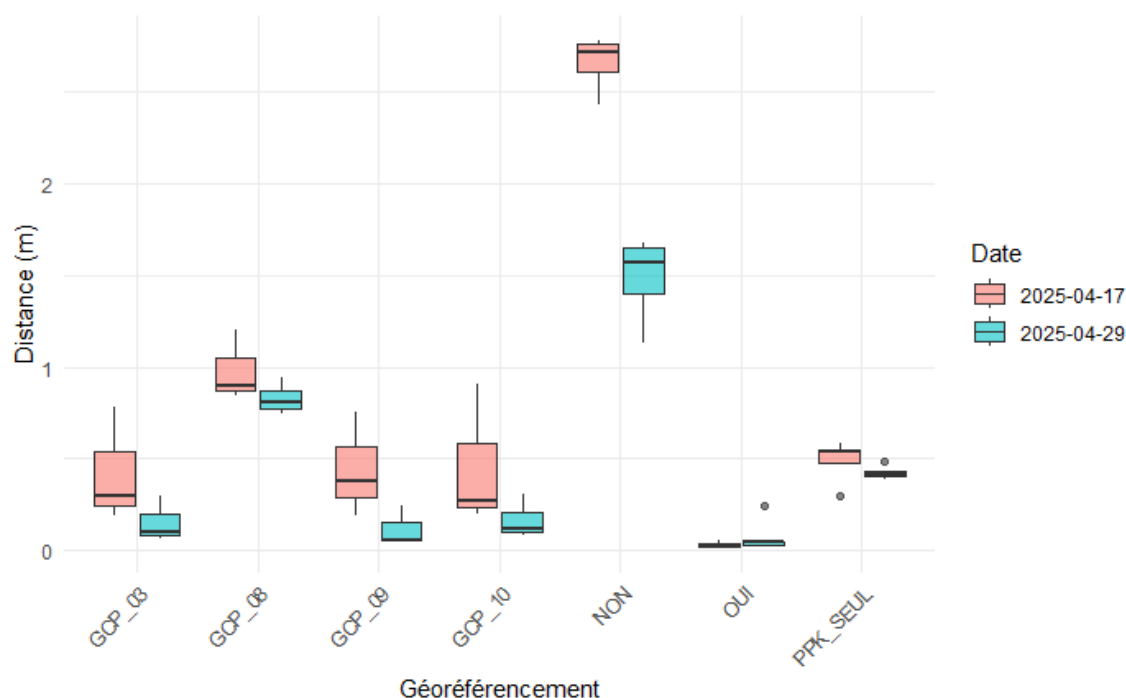


FIGURE 9 – Comparaison de la distance des GCPs pour différentes configurations d'orthomosaïques (17/04/2025 et 29/04/2025 - zone 2 - scénario 2). Les groupes *GCP_XX* correspondent aux orthomosaïques produites avec uniquement le GCP indiqué et validé avec les 3 autres GCPs. Le groupe *NON* correspond à l'orthomosaïque produite sans GCP et sans PPK, le groupe *PPK_SEULEMENT* correspond à l'orthomosaïque produite avec PPK mais sans GCP et enfin *OUI* correspond à l'orthomosaïque où les points 3, 9 et 10 ont été utilisés pour l'optimisation.

autres GCP, localisés majoritairement en bordure de zone ou en milieu ouvert, affichent des précisions nettement supérieures, avec des erreurs comprises entre 0,119 m et 0,217 m, quel que soit leur rôle (optimisation ou validation). Ainsi, il semble que les erreurs de positionnement soient influencées par la présence d'un couvert forestier (ou autre obstacle responsable d'interférences lors du positionnement RTK), affectant à la fois la précision absolue et relative des orthomosaïques produites. CHO et al. (2024) ont montré des erreurs plus importantes en RTK dans des zones densément boisées, avec un RMSE de 0.26m pour des forêts de 430 arbres/ha, contre 0.48m pour des forêts de 1025 arbres/ha. A titre de comparaison et dans le cas présent, la densité des hêtres dans la zone d'étude 1 est estimée (pour le bloc 2D) à environ 1950 arbres/ha contre environ 450 arbres/ha pour la zone d'étude 2. De ce fait, la précision indiquée lors de la production des points RTK (1 à 2cm) n'est pas représentative de la précision réelle atteinte en milieu forestier dense.

Dans ce contexte, l'utilisation de GCP situés en dehors de ces zones denses est à privilégier pour améliorer la qualité des produits finaux en absolu. Cependant, les GCPs placés dans le milieu forestier peuvent toujours être utilisés afin de quantifier les erreurs relatives, en complément des GCPs placés en zone dégagée.

Cependant, bien que la précision des orthomosaïques ait pu être quantifiée, des facteurs externes ont pu influencer la qualité des produits finaux. Ces facteurs, liés aux conditions de vol et aux traitements, sont présentés dans la section suivante.

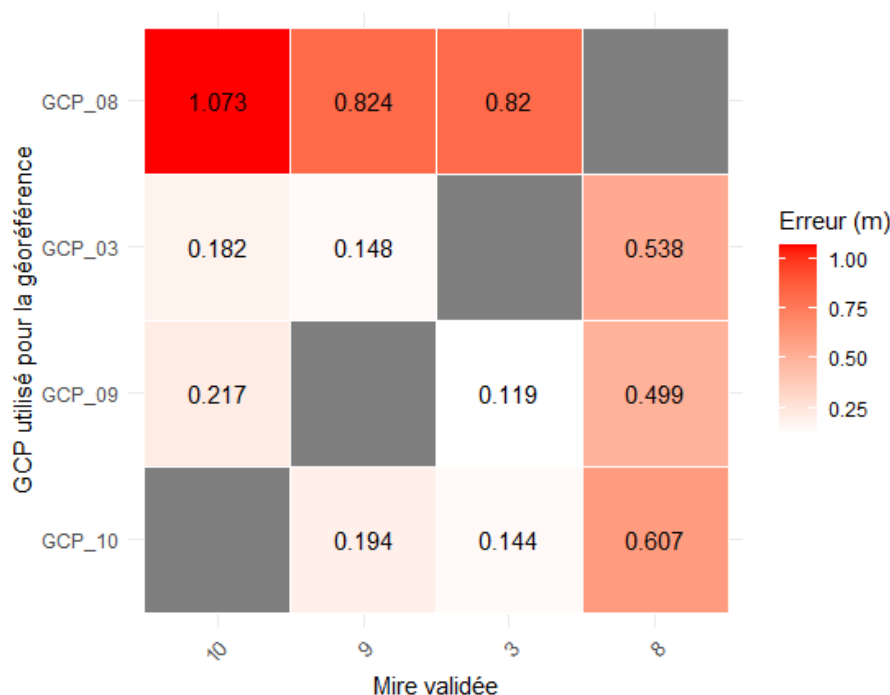


FIGURE 10 – Matrice de validation-croisée pour chaque GCP sur l'orthomosaïque du 17/04/2025 et du 29/04/2025 (zone 2 - scénario 2).

3.1.4 Conditions météorologiques

Les conditions météorologiques ont également joué un rôle important dans la qualité des orthomosaïques produites. En effet, **le vent peut jouer un rôle crucial** dans la qualité des images capturées, en particulier pour les vols à basse altitude (FREY et al. 2018). Ainsi, les vols se sont caractérisés par des différences de vent importantes, allant de conditions calmes à des rafales de vent. Ces variations ont pu entraîner des **décalages de la canopée entre les dates de vol** ou bien rendre **l'alignement des images plus difficile**, entraînant des erreurs dans l'orthomosaïque finale. Les deux stations météorologiques les plus proches des zones d'étude (station de Rouen et station de Beauvais) ont été récupérées (Météostat) pour évaluer les conditions de vent lors des vols et sont présentées en Figure 11.

En résulte des vols avec une vitesse moyenne de vent de 3.47 ± 1.2 m/s et des rafales de 9.46 ± 2.47 m/s, à même d'avoir un impact sur la qualité des orthomosaïques produites. SLADE et al. (2025) ont montré que, pour chaque 1 m/s d'augmentation de la vitesse du vent, l'erreur de positionnement de la hauteur de la canopée issue de la photogrammétrie augmentait de 5 cm.

Cependant, cette évolution de la précision dépend **fortement de la plante étudiée ainsi que de la hauteur de cette dernière**. Ainsi, CUNLIFFE et al. (2022) ont montré que le vent avait bien un **impact négatif sur la reconstruction photogrammétrique**, mais que cet impact avait été peu important dans le cas d'une végétation basse (entre 8cm et 1m de hauteur en moyenne) pour des vents inférieurs à 3 m/s.

Dans le cas présent, la hauteur des hêtres étant bien plus importante (25m) et le vent étant souvent supérieur à 3 m/s, **il est probable que le vent ait bien eu un impact significatif sur les reconstructions et donc sur les orthomosaïques produites**. De plus, la présence de rafales durant les vols a pu **accentuer cet impact négatif** mais

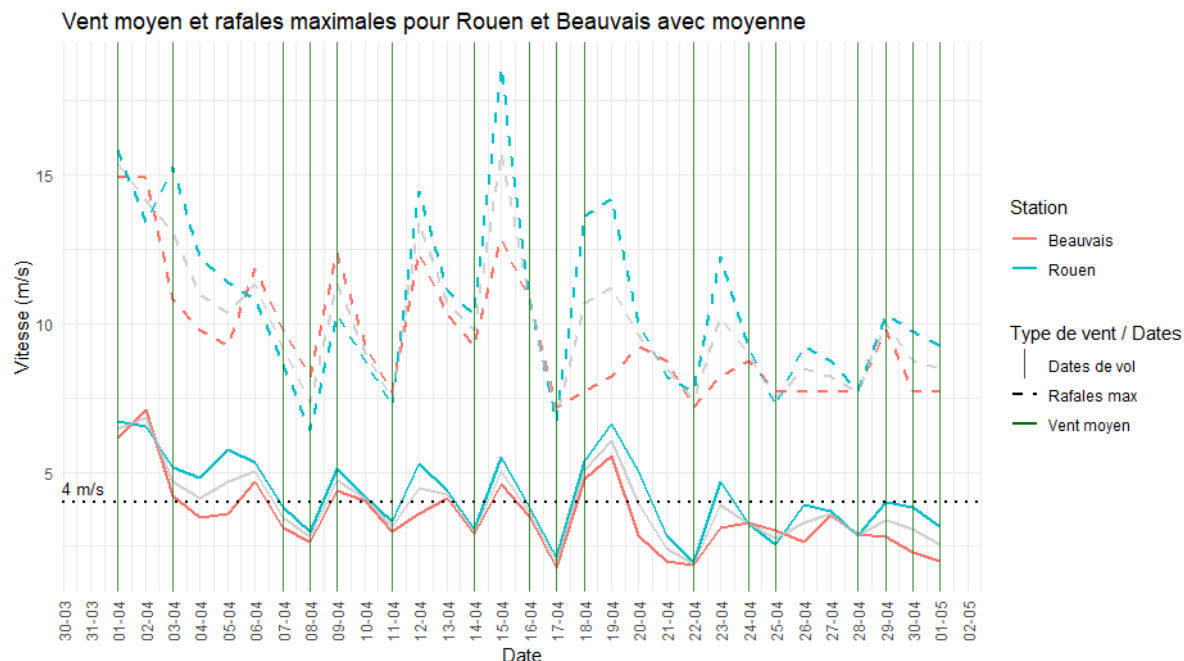


FIGURE 11 – Vitesse du vent (m/s) et rafales (m/s) enregistrées par les stations de Rouen (haut) et Beauvais (bas) durant le mois d'avril 2025.

n'a pas été quantifié dans la littérature et est complexe à évaluer sur le terrain du fait de leur caractère aléatoire.

3.2 Corrections radiométriques

Les orthomosaïques produites présentent des réflectances particulièrement faibles dans l'ensemble des bandes, avec une sensibilité réduite pour les bandes RedEdge et NIR.

Deux linoléums de calibration radiométrique, l'un gris clair et l'autre gris foncé, ont été utilisés lors des vols. Les mesures de laboratoire transmises par Sophie FABRE (24/04/2025) indiquaient des réflectances comprises entre 0,35 et 0,40 pour le lino clair, et entre 0,25 et 0,27 pour le lino foncé (dans toutes les longueurs d'onde). Ces valeurs sont cohérentes, voire légèrement inférieures, à celles observées lors des campagnes précédentes au Fauga. Toutefois, pour le vol du 29/04/2025, les valeurs mesurées sur ces surfaces s'avèrent nettement inférieures aux attentes, avec 0,0504 pour le lino clair et 0,0489 pour le lino foncé dans le NIR. L'analyse de pixels centraux après calibration radiométrique (DLS + CRP avant et après le vol) dans Metashape révèle des valeurs similaires, comprises entre 0,04 et 0,06 pour les deux linoléums. Cependant, le traitement des images avec uniquement le CRP (sans DLS) conduit à des valeurs plus élevées en fonction du CRP utilisé. La méthode donnant les valeurs les plus proches de la réalité semble être l'utilisation du CRP avant le vol, qui donne des valeurs de 0,385 pour le lino clair et 0,280 pour le lino foncé dans le NIR. L'ensemble des autres méthodes semble sous-évaluer la réflectance réelle des linoléums, tout particulièrement pour celles utilisant le DLS (Figure 12).

Cependant, les traitements réalisés pour cette orthomosaïque n'étaient pas différents de ceux appliqués pour des vols d'essais effectués en janvier et février 2025 (ONERA - Le Fauga) où les valeurs de réflectance obtenues étaient conformes aux attentes. De plus, les valeurs d'irradiance mesurée par le DLS, qui pourrait être incriminé aux vues des faibles

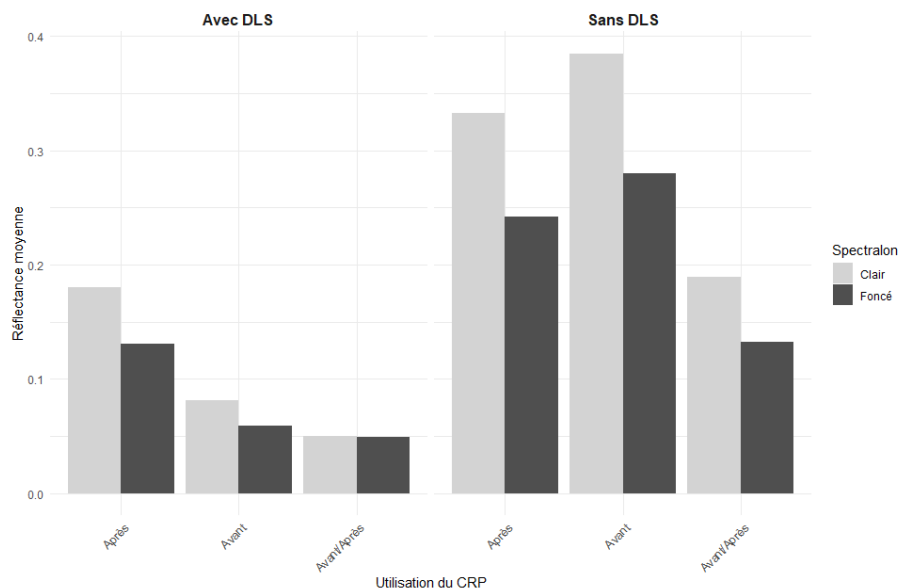


FIGURE 12 – Valeur moyenne de réflectance dans le NIR au centre des linoléums en fonction de la méthode de calibration radiométrique utilisée.

valeurs obtenues, semblent cohérentes avec les conditions d'ensoleillement observées lors du vol (Figure 13).

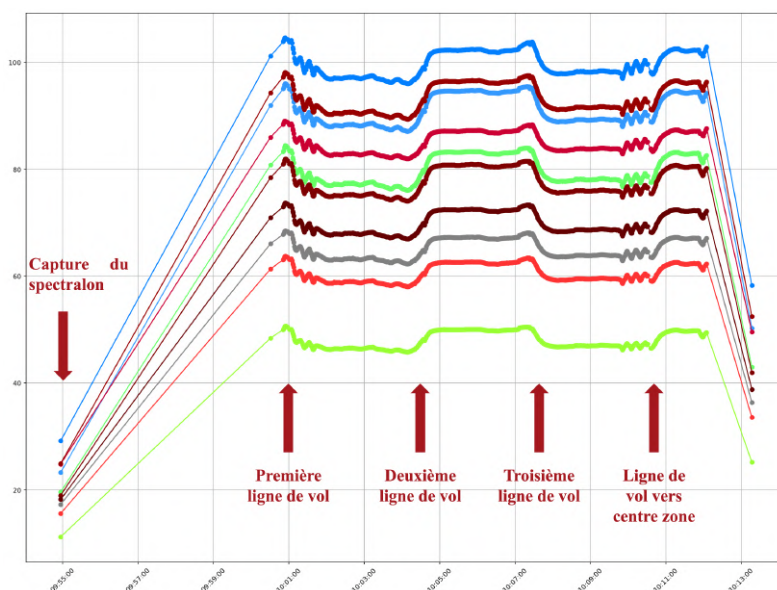


FIGURE 13 – Irradiance relevée par le DLS pour chaque longueur d'onde durant le vol du 29/04/2025 (zone 2 - scénario 2). Le dernier point correspond également à la capture du spectralon.

Deux hypothèses peuvent être avancées pour expliquer la présence de ce problème sur les orthomosaïques produites durant cette campagne. La première est liée à un **problème de calibration du capteur** dans Metashape. En effet, l'inspection dans le logiciel du centre du spectralon a renvoyé, après calibration dans le projet, des valeurs de 0.14 en réflectance. Il semble donc que la correction appliquée ne soit pas correcte et cette piste doit être creusée auprès de Metashape.

La seconde hypothèse est liée à la saturation du capteur. COTTRELL et al. (2024) ont montré que le capteur MicaSense Altum saturait rapidement au-delà de certaines valeurs de réflectance en fonction de la bande considérée, avec une saturation plus importante pour les longueurs d'ondes les plus faibles. Cependant, ils montrent également que cette saturation se retrouve directement dans les valeurs de pixels bruts, avant toute calibration radiométrique. Or, l'inspection de l'orthomosaïque brute du 29/04/2025 montre, dans toutes les bandes, des valeurs comprises en majorité entre 0 et 50000 (Figure 14). En cas de saturation, les valeurs tendraient toutes vers le maximum pour du 16bit, soit 65535.

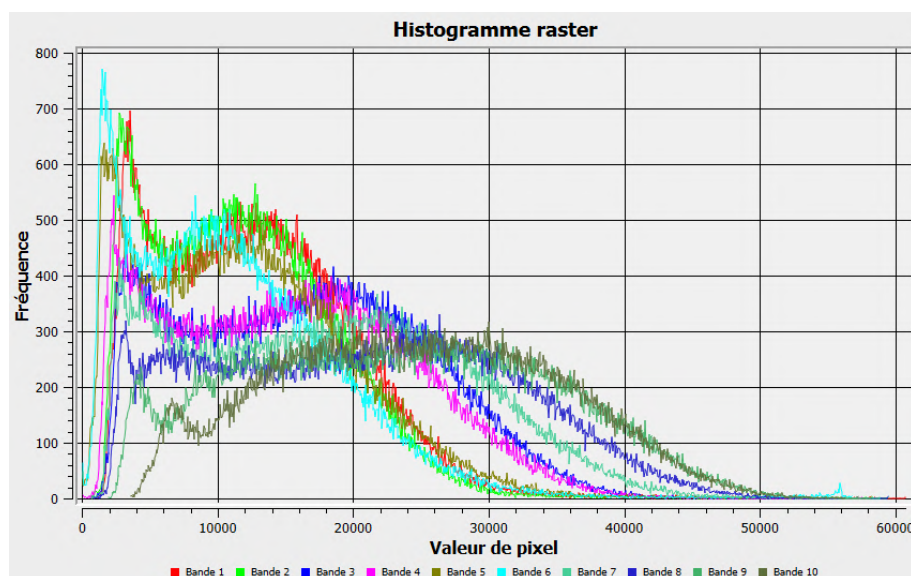


FIGURE 14 – Distribution des valeurs de pixels bruts (DN) pour chaque bande de l'orthomosaïque du 29/04/2025 (zone 2 - scénario 2).

Enfin, le calcul du NDVI avec cette orthomosaïque renvoie des valeurs incohérentes, le sol nu pouvant alors avoir des valeurs comprises entre 0.4 et 0.8. Cet élément combiné aux autres observations semble indiquer un problème de calibration radiométrique dans Metashape. De plus amples analyses, incluant l'utilisation d'un Empirical Line Model (ELM), sont à mener afin de déterminer l'origine exacte de ce problème ainsi que de le corriger.

En conclusion, bien que l'utilisation du CRP sans DLS semble donner des résultats plus proches de la réalité sur les linoléums, la distribution des valeurs de réflectance ne semble pas conforme aux attentes, ceci étant validé par des valeurs de NDVI dans le même ordre d'idée que celles obtenues avec DLS/CRP. Les deux techniques ne semblent donc pas permettre d'obtenir des orthomosaïques viables en l'état actuel des traitements. Les analyses complémentaires à mener sont donc les suivantes :

- dépouillement des données acquises par l'ASD et conversion en réflectance afin de comparer avec les valeurs issues des orthomosaïques ;
- utilisation des données en réflectance de l'ASD pour créer un ELM et tester cette correction sur l'orthomosaïque du 29/04/2025 ;
- prise de contact avec Metashape afin d'investiguer un possible problème de calibration du capteur dans le logiciel ;
- tests de calibration radiométrique en amont des traitements dans Metashape (via un script Python) afin de contourner un possible problème dans le logiciel.

3.3 Problèmes survenus lors des traitements

Lors de la production des orthomosaïques, plusieurs problèmes ont été rencontrés puis, lorsque cela était possible, résolus. Ces problèmes, leurs origines probables ainsi que les solutions apportées sont présentés ci-dessous. Le cas particulier de l'orthomosaïque du 29/04/2025 (Z2S2) va donc être ici détaillé.

3.3.1 Duplications dans l'orthomosaïque

Le 14/04/2025 (zone 2) et le 22/04/2025 (zone 1), certaines images ont été dupliquées dans les orthomosaïques finales, entraînant la présence d'arbres dédoublés (ou de GCPs) dans une zone spécifique. Ce problème a probablement été causé par un mauvais alignement de certaines images : les zones affectées ont été délimitées par un polygone, auquel seules les caméras correctement alignées ont été assignées. Les orthomosaïques ont ensuite été recalculées et le problème résolu (Figure 15).

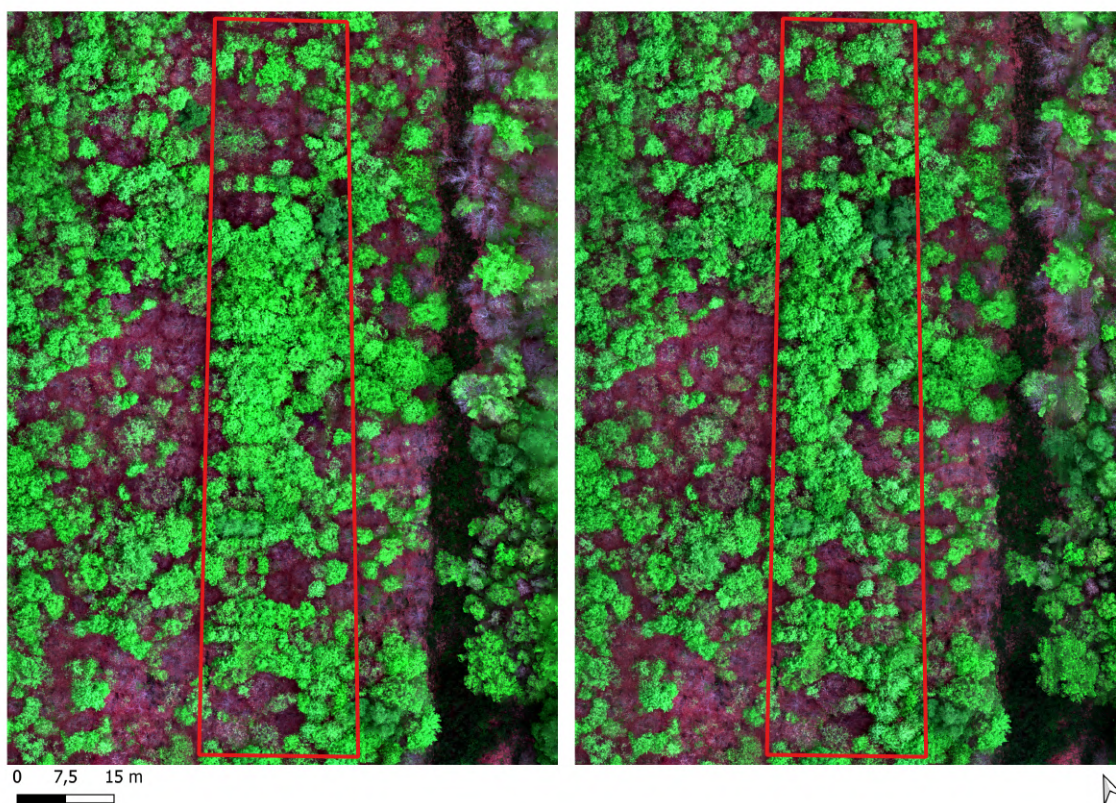


FIGURE 15 – Exemple de duplication d'arbres dans l'orthomosaïque du 22/04/2025 (zone 1) avant (gauche) et après (droite) correction.

3.3.2 Artefacts et bruit dans l'orthomosaïque

Les orthomosaïques produites les 08, 09 et 11 avril 2025 (toutes zones) présentaient un niveau élevé de bruit et d'artefacts, vraisemblablement liés à un **mauvais alignement des images**. Pour corriger ce problème, l'alignement a été relancé en augmentant la limite de points de liaison de 8000 à 12000, **sans amélioration significative**.

Le **MNS photogrammétrique** généré pour ces dates ne restituait qu'une partie des arbres : la majorité n'était pas reconstruite, ce qui a conduit à une projection erronée des

orthomosaïques dans de nombreuses zones. Plusieurs alternatives ont alors été testées. L'utilisation d'un **MESH** en remplacement du MNS a permis d'obtenir des orthomosaïques présentant moins d'artefacts, mais la structure des arbres y était souvent mal restituée : de nombreux trous subsistaient et certains arbres étaient projetés au sol. L'emploi du **MNS LiDAR** a, de son côté, permis de réduire les artefacts tout en conservant une structure plus réaliste des arbres. Néanmoins, même avec cette solution, l'orthomosaïque produite restait entachée de nombreuses imperfections par rapport aux dates postérieures (Figure 16).

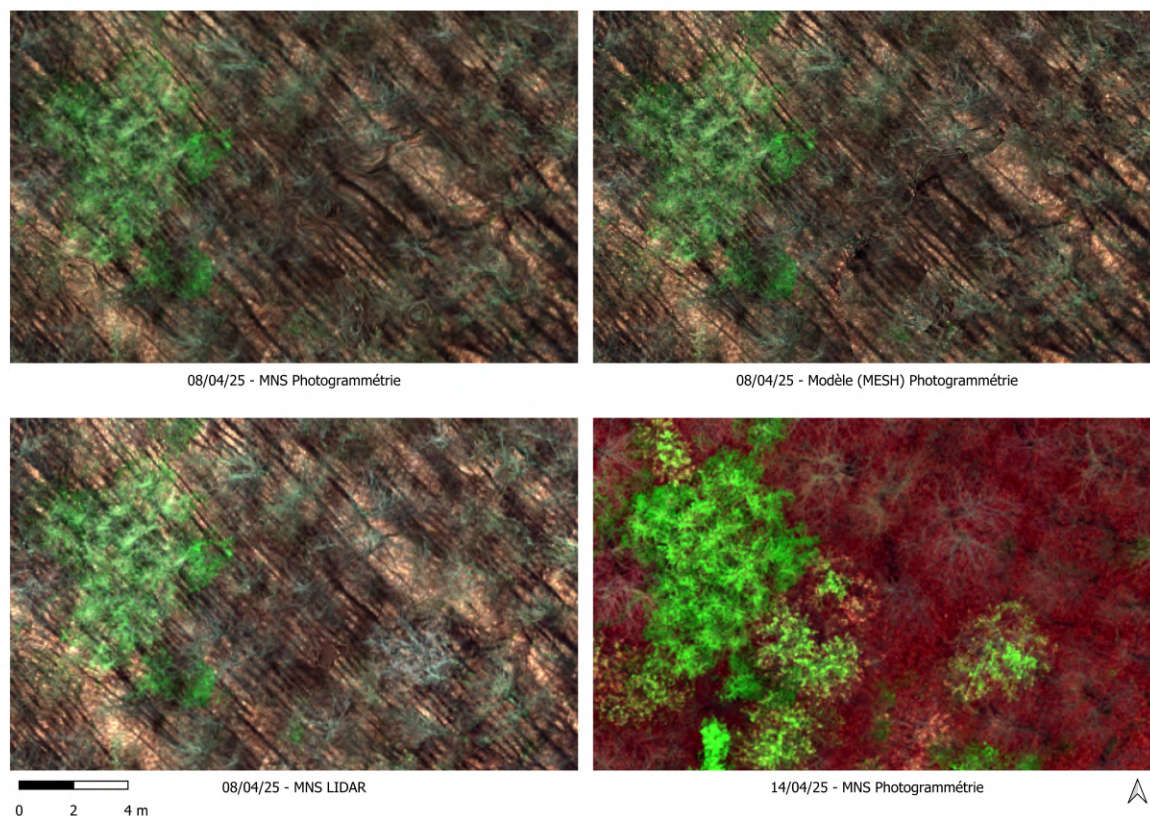


FIGURE 16 – Comparaison d'une orthomosaïque produite via le MNS de Metashape (haut gauche), le MESH Metashape (haut droite) et le MNS LIDAR (bas gauche) avec une orthomosaïque produite le 14/04/2025 (bas droite).

Le problème n'a donc pas pu être entièrement résolu et les orthomosaïques de ces dates présentent toujours un niveau important de **bruit et d'artefacts**. Cela est très probablement lié aux limites de la photogrammétrie en conditions de canopée défeuillée, créant de fait une zone homogène où moins de points de liaison sont disponibles (BRACH, CHAN et SZYMANSKI 2019).

Les relevés phénologiques réalisés sur le terrain (BBCH) semblent corroborer cette hypothèse : les dates antérieures au 14/04/2025 montrent une médiane de BBCH plus basse et une variabilité moins importante (Figure 17). Le cumul de cette canopée défeuillée avec l'effet du vent (voir section précédente) est donc susceptible d'être à l'origine des difficultés rencontrées lors de la production des orthomosaïques pour ces dates.

Afin de mitiger ce problème dans le futur, le vol par temps calme (sans vent) est encore une fois recommandé mais, si ces conditions ne peuvent être garanties, il est conseillé d'augmenter la hauteur de vol afin de réduire l'impact dudit vent ainsi qu'améliorer la

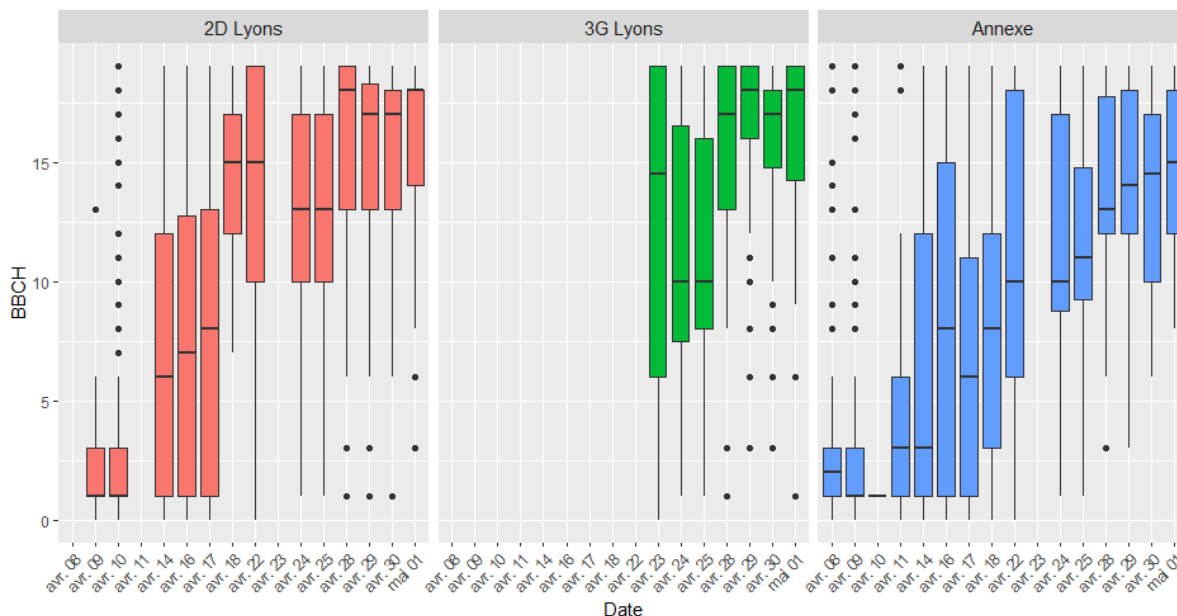


FIGURE 17 – Evolution du BBCH en fonction de la date et du dispositif expérimental.

reconstruction photogrammétrique.

Dans le cas où la hauteur de vol serait modifiée, le GSD le serait également. Il serait donc envisageable de produire des orthomosaïques selon le scénario 3 (8cm/px) pour les dates où la canopée est défeuillée puis de rééchantillonner ces dernières à 4cm/px pour les rendre comparables aux autres dates. Un test de traitement du scénario 3 pour le 01/04/2025 a été réalisé et a permis de produire une orthomosaïque, non exempte d'artefacts, contrairement au scénario 2 où l'alignement des caméras était impossible.

Aussi, FREY et al. (2018) suggèrent que l'augmentation de recouvrement latéral et frontal a un effet plus important que la diminution du GSD. Il serait donc possible d'augmenter le recouvrement latéral et frontal sans modifier la hauteur de vol. Cette solution demanderait cependant un temps de capture plus important, à l'inverse d'une augmentation de la hauteur de vol. Cette piste reste donc encore à explorer pour la suite du projet FagRescue et à adapter en fonction des futures missions.

3.3.3 Dysfonctionnement du capteur multispectral et du capteur de lumière

Après import des images du vol du **01/05/2025**, le spectralon n'a pas été détecté automatiquement par Metashape sur toutes les bandes (8 sur 10). La cause du problème a été identifiée comme étant un **problème d'écriture des métadonnées EXIF des images par le capteur multispectral**; les 2 bandes problématiques ne comportaient pas le numéro de série du panneau de calibration ni la valeur de calibration. Ces informations sont nécessaires pour que Metashape puisse calibrer correctement les images et ont donc été ajoutées **manuellement via un script Python** :

```
chunk = Metashape.app.document.chunk
for camera in chunk.cameras:
    if "IMG_XXXX_X" in camera.label or "IMG_XXXX_X" in camera.label:
        camera.meta["ReflectancePanel/SerialNumber"] = "RP06-2235074-0B"
        camera.meta["ReflectancePanel/Calibration"] = "0.509"
print("Métadonnées mises à jour")
```


La valeur de 0.509 est une valeur de base non utilisée par Metashape, les vraies valeurs de calibration ayant été fournies par le constructeur du panneau et rentrée dans Metashape. De plus, la détection automatique n'ayant pas fonctionné, il a fallu créer manuellement les masques manquants afin de capturer uniquement la surface de reflectance du panneau.

Le vol du **03/04/2025** (5 bandes) a également présenté un problème, mais cette fois-ci lié au **capteur de lumière**. L'orthomosaïque apparaissait très sombre sur la première partie du vol et très lumineuse pendant la seconde partie. Ce problème est probablement dû à une **obstruction du capteur de lumière** lors de la capture du panneau de calibration avant le vol, entraînant une mauvaise calibration radiométrique des images. Afin de contourner ce problème, le capteur de lumière a été désactivé dans Metashape et la calibration radiométrique a été effectuée uniquement via le panneau de calibration.

4 Conclusion

Les traitements réalisés au cours de l'été 2025 ont permis de produire la majorité des orthomosaïques attendues pour le scénario 2, malgré l'apparition de certains problèmes techniques qui ont pu être résolus. Toutefois, quelques images demeurent d'une qualité incertaine, ce qui compromet leur exploitation a posteriori. Par ailleurs, bien que l'orthorectification se soit appuyée sur l'utilisation du PPK, du RTK et de points de contrôle au sol (GCP), une étape supplémentaire de corrélation apparaît nécessaire afin d'améliorer la superposition des images entre chaque date et, in fine, d'obtenir une série temporelle plus homogène et scientifiquement exploitable.

Comme évoqué précédemment dans ce rapport, plusieurs difficultés rencontrées trouvent leur origine directement dans les conditions de capture des données sur le terrain. Dans le cadre de futurs vols similaires (survol de peuplements forestiers avec un capteur multispectral), les points suivants doivent être pris en considération afin d'optimiser la qualité des acquisitions.

- **Privilégier les zones dégagées pour le survol, quitte à élargir la zone d'étude** : cela permet de réduire les artefacts liés aux occultations du couvert forestier et d'assurer une meilleure homogénéité radiométrique et géométrique.
- **Installer les mires de géoréférencement dans ces zones ouvertes** : leur positionnement dans des espaces sans obstruction garantit une meilleure visibilité par le capteur et donc une plus grande précision dans l'ancrage spatial des orthomosaïques.
- **Réaliser les vols dans des conditions météorologiques calmes** : le vent est une source importante de flou et de décalages inter-images, en particulier en sous-bois ou au-dessus de peuplements hétérogènes.
- **Si des conditions calmes ne peuvent pas être garanties, augmenter la hauteur de vol** : voler plus haut réduit l'effet relatif du déplacement de la canopée dû au vent. Des tests sur des images selon le scénario 3 (8cm/px) semblent mitiger les effets de vent observés selon le scénario 2 sur les mêmes dates.
- **Si les vols selon des conditions calmes ou avec un GSD moins important n'est pas possible**, augmenter le recouvrement latéral et frontal : FREY et al. (2018) suggèrent que l'augmentation de recouvrement latéral et frontal a un effet plus important que la diminution du GSD.

- **Veiller à ne pas obstruer le capteur DLS2 lors de la capture du spectralon** : les obstructions de ce dernier peuvent avoir un impact sur la correction radiométrique effectuée, et donc sur le produit fini.

Références

- BRACH, M, Jew CHAN et P SZYMANSKI (31 oct. 2019). “Accuracy Assessment of Different Photogrammetric Software for Processing Data from Low-Cost UAV Platforms in Forest Conditions”. In : *iForest - Biogeosciences and Forestry* 12.5, p. 435-441. ISSN : 19717458. DOI : 10.3832/ifor2986-012. URL : <https://iforest.sisef.org/?doi=ifor2986-012> (visité le 01/09/2025).
- CHO, Hyun-Min et al. (jan. 2024). “Assessment of the GNSS-RTK for Application in Precision Forest Operations”. In : *Remote Sensing* 16.1, p. 148. ISSN : 2072-4292. DOI : 10.3390/rs16010148. URL : <https://www.mdpi.com/2072-4292/16/1/148> (visité le 29/09/2025).
- COTTRELL, Brendan et al. (jan. 2024). “Limitations of a Multispectral UAV Sensor for Satellite Validation and Mapping Complex Vegetation”. In : *Remote Sensing* 16.13, p. 2463. ISSN : 2072-4292. DOI : 10.3390/rs16132463. (Visité le 13/10/2025).
- CUNLIFFE, Andrew M. et al. (2022). “Global Application of an Unoccupied Aerial Vehicle Photogrammetry Protocol for Predicting Aboveground Biomass in Non-Forest Ecosystems”. In : *Remote Sensing in Ecology and Conservation* 8.1, p. 57-71. ISSN : 2056-3485. DOI : 10.1002/rse2.228. (Visité le 29/08/2025).
- FREY, Julian et al. (juin 2018). “UAV Photogrammetry of Forests as a Vulnerable Process. A Sensitivity Analysis for a Structure from Motion RGB-Image Pipeline”. In : *Remote Sensing* 10.6, p. 912. ISSN : 2072-4292. DOI : 10.3390/rs10060912. (Visité le 29/08/2025).
- SIVANANDAM, Poornima et al. (8 mai 2023). *TERN Drone RGB and Multispectral Data Processing Protocol*.
- SLADE, Glenn et al. (jan. 2025). “Repeated Drone Photogrammetry Surveys Demonstrate That Reconstructed Canopy Heights Are Sensitive to Wind Speed but Relatively Insensitive to Illumination Conditions”. In : *International Journal of Remote Sensing* 46.1, p. 24-41. ISSN : 0143-1161. DOI : 10.1080/01431161.2024.2377832. (Visité le 29/08/2025).