

## **Modéliser la hauteur, biomasse et composition floristique des prairies : comparaison de données LiDAR, photogrammétriques et spectrales acquises par différents drones**

**Auteur :** Philippart, Julien

**Promoteur(s) :** Bastin, Jean-François; Bindelle, Jérôme

**Faculté :** Gembloux Agro-Bio Tech (GxABT)

**Diplôme :** Master en bioingénieur : sciences agronomiques, à finalité spécialisée

**Année académique :** 2023-2024

**URI/URL :** <http://hdl.handle.net/2268.2/21097>

---

### *Avertissement à l'attention des usagers :*

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

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

---

## 11. Annexes

### A. Produits intermédiaires lors du traitement photogrammétrique

Les figures suivantes sont présentées à des fins d'illustration des différents produits qu'il est possible d'obtenir au départ d'images lorsque celles-ci sont traitées dans le logiciel Agisoft Metashape. La Figure 24 présente un nuage de points dense servant de base à la classification des points de sol. La Figure 25 représente une orthomosaïque RGB. Les Figures 26 et 27 représentent quant à elles respectivement un Modèle Numérique de Surface (MNS) et un Modèle Numérique de Terrain (MNT) obtenus après classification et rasterisation du nuage de points.

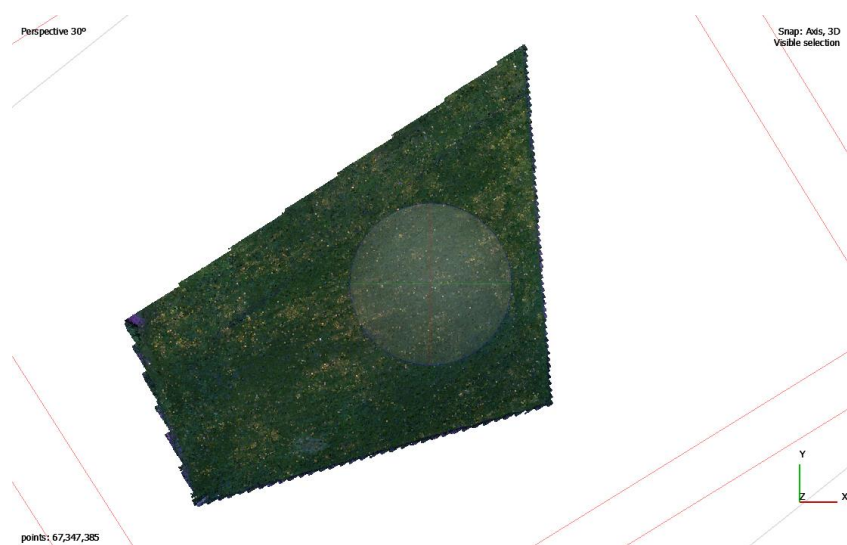


Figure 24 - Visualisation dans Agisoft Metashape du nuage de points généré à partir des données acquises le 10 avril avec le drone DJI Mavic 3M.



Figure 25 - Visualisation dans Agisoft Metashape de l'orthomosaïque RGB générée à partir des données acquises le 10 avril avec le drone DJI Mavic 3M.

## Annexes

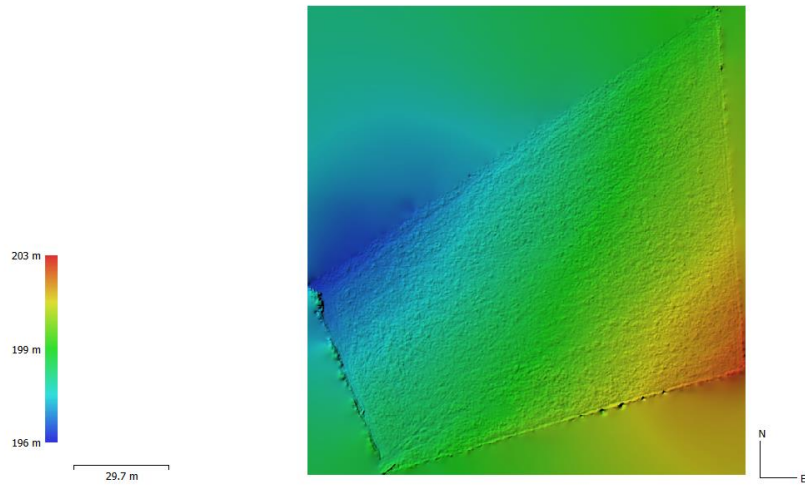


Figure 26 - Visualisation dans Agisoft Metashape du Modèle Numérique de Surface généré à partir des données acquises le 10 avril avec le drone DJI Mavic 3M.

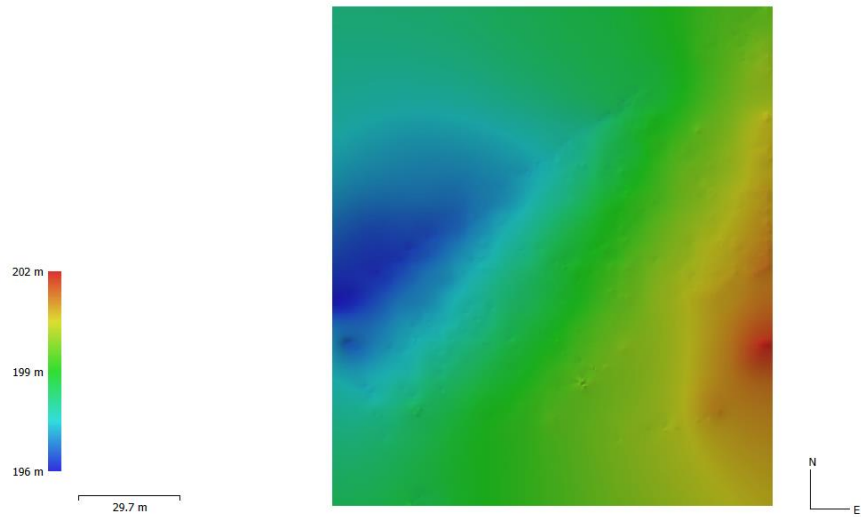


Figure 27 - Visualisation dans Agisoft Metashape du Modèle Numérique de Terrain généré à partir des données acquises le 10 avril avec le drone DJI Mavic 3M.

## B. Statistiques des résidus de hauteur utilisés dans l'ANOVA

Ce paragraphe fournit deux tableaux présentant les statistiques détaillées des résidus ayant été comparés au moyen de l'ANOVA non-paramétrique et des tests de Kruskal-Wallis. Cette information avait été résumée à la Figure 15 sous forme de graphe. L'intervalle de confiance a été calculé avec un seuil à 95% avec la formule ( $n = 24$ ) :

$$IC = \bar{y} + /- 1,96 * \frac{sd}{\sqrt{n}}$$

où :  $\bar{y}$  = moyenne des résidus  
 $sd$  = écart-type des résidus  
 $n$  = nombre de résidus

Tableau 20 - Statistiques des résidus en validation des 9 régressions linéaires issues de la photogrammétrie.

Matériel	MNT	Moyenne [m]	Ecart-type [m]	Médiane [m]	Erreur standard [m]	Limite inf. IC [m]	Limite sup. IC [m]
MINI 2	MNT 1	0,239	0,0869	0,248	0,0177	0,204	0,273
	MNT 2	0,166	0,149	0,203	0,0304	0,107	0,226
	MNT 3	0,187	0,141	0,197	0,0289	0,131	0,244
3M	MNT 1	0,119	0,0585	0,119	0,0119	0,095	0,142
	MNT 2	0,139	0,0651	0,138	0,0133	0,113	0,165
	MNT 3	0,164	0,0524	0,156	0,0107	0,143	0,185
MICASENSE	MNT 1	0,118	0,0614	0,117	0,0125	0,0930	0,142
	MNT 2	0,0547	0,0762	0,0503	0,0156	0,0241	0,0852
	MNT 3	0,0609	0,0680	0,0708	0,0139	0,0337	0,0881

Tableau 21 - Statistiques des résidus en validation des 2 régressions linéaires issues du traitement Lidar.

Matériel	Méthode	Moyenne [m]	Ecart-type [m]	Médiane [m]	Erreur standard [m]	Limite inf. IC [m]	Limite sup. IC [m]
Lidar	Normalisation	0,0592	0,0585	0,0610	0,0119	0,0358	0,0826
	Rasterisation	0,110	0,0958	0,109	0,0195	0,0721	0,149

## C. Cartes de hauteur et de biomasse

Dans le corps de texte, la Figure 16 présentait la carte de hauteur générée après application du modèle développé avec les données 3M-MNT1 sur la prairie de validation. Dans cette annexe, les Figures 28 et 29 présentent les cartes de hauteur générées après application du modèle développé pour les capteurs Mini2-MNT1 et MicaSense-MNT1. Ce sont ces trois cartes, qui, réunies, ont servi à générer la carte de l'écart-type de la hauteur estimée entre les modèles, présentée à la Figure 17. La Figure 30 est, quant à elle, issue de l'application du modèle RF de prédiction de la biomasse de la MicaSense avec l'ensemble des variables (modèles 21) sur la prairie de validation et est présentée à des fins illustratives. Cette carte de biomasse n'a pas été générée pour l'ensemble des modèles au vu de leur nombre élevé.

## Annexes

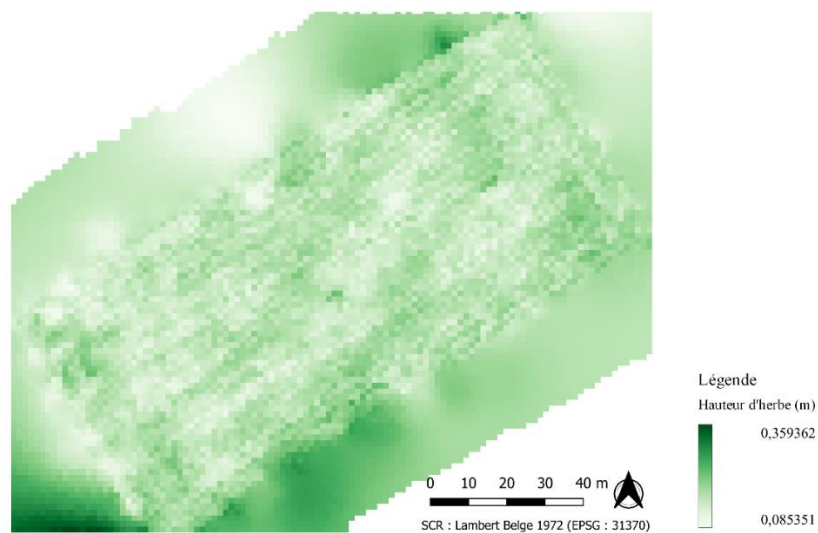


Figure 28 - Carte de hauteur prédite sur la prairie de validation avec le modèle Mini2-MNT1.

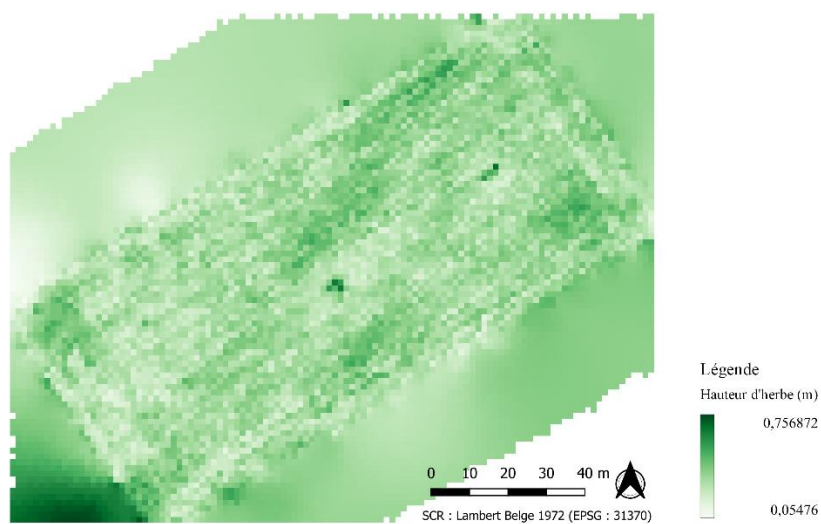


Figure 29 - Carte de hauteur prédite sur la prairie de validation avec le modèle MicaSense-MNT1.

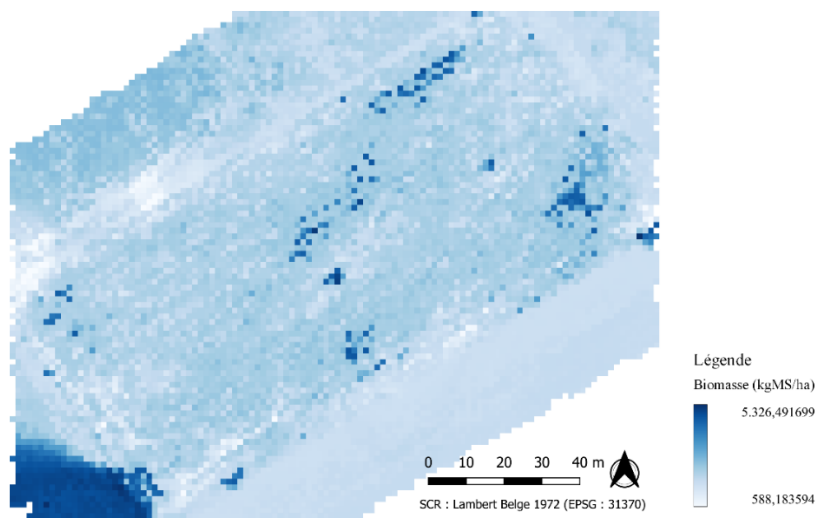


Figure 30 - Carte de biomasse prédite sur la prairie de validation avec le modèle RF de la MicaSense (modèles 21).

## D. Performances des différents modèles intermédiaires

Dans le corps du travail, seuls les tableaux de performances de l'ensemble des modèles avec l'ensemble des variables explicatives étaient présentés. Ci-dessous sont présentés différents tableaux avec les résultats des différents modèles intermédiaires de prédiction de la biomasse pour les trois drones en fonction du nombre de variables explicatives utilisées pour chacun.

Tableau 22 - Performances des modèles d'estimation de la biomasse du Mini 2 à partir des 4  $IV_{RGB}$  (modèles 13).

Matériel	Modèle	R2 calib. [-]	R2 valid. [-]	RMSE calib. [kgMS/ha]	RMSE valid. [kgMS/ha]	rRMSE calib. [%]	rRMSE valid. [%]
Mini 2	Stepwise (2 var.)	0,243	0,130	1182,57	2005,80	64,3	73,5
	Forward (2 var.)	0,243	0,130	1182,57	2005,80	64,3	73,5
	Backward (3 var.)	0,266	0,00861	1154,53	1781,37	62,7	65,2
	PCR (ncomp=1)	0,008	0,174	1375,33	1363,02	74,7	49,9
	PLS (ncomp=1)	0,236	0,0510	1207,07	2215,21	65,6	81,1
	RF (ntree=500 ; nsize= 10 ; mtry= 3)	0,0655	0,159	1335,12	1119,97	72,5	41,0
	SVM linéaire (C=0,01)	0,263	0,0935	1294,15	1373,02	70,3	50,3
	SVM radial (sigma= 0,075 ; C= 0,1)	0,173	0,0888	1145,1	1306,41	41,9	47,8

Tableau 23 - Performances des modèles d'estimation de la biomasse du 3M à partir des 4  $IV_{RGB}$  (modèles 15).

Matériel	Modèle	R2 calib. [-]	R2 valid. [-]	RMSE calib. [kgMS/ha]	RMSE valid. [kgMS/ha]	rRMSE calib. [%]	rRMSE valid. [%]
3M	Stepwise (2 var.)	0,306	0,00503	1131,83	2000,62	61,5	73,3
	Forward (2 var.)	0,306	0,00503	1131,83	2000,62	61,5	73,3
	Backward (2 var.)	0,306	0,00503	1131,83	2000,62	61,5	73,3
	PCR (ncomp=1)	0,026	0,090	1381,09	1486,89	75,1	54,4
	PLS (ncomp=1)	0,261	0,039	1381,09	2220,46	75,1	81,3
	RF (ntree=500 ; nsize= 5 ; mtry= 1)	0,115	0,0075	1299,62	1145,18	70,1	41,9
	SVM linéaire (C=0,75)	0,400	0,000572	1214,80	1760,24	66,0	64,5
	SVM radial (sigma= 0,1 ; C= 0,25)	0,297	0,0143	1146,2	1342,07	62,3	49,2

## Annexes

Tableau 24 - Performances des modèles d'estimation de la biomasse du 3M à partir des 4  $IV_{RGB}$  et des métriques de hauteur (modèles 16).

Matériel	Modèle	R2 calib. [-]	R2 valid. [-]	RMSE calib. [kgMS/ha]	RMSE valid. [kgMS/ha]	rRMSE calib. [%]	rRMSE valid. [%]
3M	Stepwise (2 var.)	0,598	0,201	861,21	1517,36	46,8	55,6
	Forward (2 var.)	0,598	0,201	861,21	1517,36	46,8	55,6
	Backward (3 var.)	0,605	0,191	839,99	1285,35	45,6	47,1
	PCR (ncomp=2)	0,576	0,272	899,26	1532,95	48,9	56,1
	PLS (ncomp=2)	0,567	0,253	908,31	1553,95	49,36	56,9
	RF (ntree=500 ; nsize= 1 ; mtry= 3)	0,513	0,125	974,15	1128,27	52,9	41,3
	SVM linéaire (C=2)	0,557	0,146	959,37	1446,24	52,1	53,0
	SVM radial (sigma= 0,025 ; C= 0,75)	0,529	0,0948	1048,89	1145,31	57,0	41,9

Tableau 25 - Performances des modèles d'estimation de la biomasse de la MicaSense à partir des 4  $IV_{RGB}$  (modèles 18).

Matériel	Modèle	R2 calib. [-]	R2 valid. [-]	RMSE calib. [kgMS/ha]	RMSE valid. [kgMS/ha]	rRMSE calib. [%]	rRMSE valid. [%]
MicaSense	Stepwise (1 var.)	0,0209	0,0820	1355,69	1428,36	73,7	52,3
	Forward (1 var.)	0,0209	0,0820	1355,69	1428,36	73,7	52,3
	Backward (1 var.)	0,0760	0,106	1295,58	1296,74	70,4	47,5
	PCR (ncomp=3)	0,037	0,136	1355,51	1453,98	73,7	53,2
	PLS (ncomp=2)	0,037	0,135	1355,62	1429,08	73,7	52,3
	RF (ntree=500 ; nsize= 5 ; mtry= 1)	-0,121	0,0296	1462,17	1160,41	79,5	42,5
	SVM linéaire (C=0,01)	0,229	0,0543	1335,72	1367,55	72,6	50,1
	SVM radial (sigma= 0,5 ; C= 0,05)	0,140	0,0160	1171,10	1424,85	77,4	52,2

## Annexes

*Tableau 26 - Performances des modèles d'estimation de la biomasse de la MicaSense à partir des 4  $IV_{RGB}$  et des métriques de hauteur (modèles 19).*

Matériel	Modèle	R2 calib. [-]	R2 valid. [-]	RMSE calib. [kgMS/ha]	RMSE valid. [kgMS/ha]	rRMSE calib. [%]	rRMSE valid. [%]
MicaSense	Stepwise (3 var.)	0,685	0,334	756,99	964,05	41,1	35,3
	Forward (3 var.)	0,685	0,334	756,99	964,05	41,1	35,3
	Backward (5 var.)	0,681	0,410	748,99	859,84	40,7	31,5
	PCR (ncomp=3)	0,633	0,369	836,39	934,62	45,5	34,2
	PLS (ncomp=2)	0,643	0,344	824,64	941,80	44,8	34,5
	RF (ntree=500 ; nsize= 5 ; mtry= 1)	0,575	0,106	900,53	1099,23	48,9	40,3
	SVM linéaire (C=5)	0,589	0,358	857,56	1012,86	46,6	37,1
	SVM radial (sigma= 0,025 ; C= 0,5)	0,428	0,263	1008,08	1037,53	54,8	38,0

*Tableau 27 - Performances des modèles d'estimation de la biomasse de la MicaSense à partir des 4  $IV_{RGB}$ , des 4  $IV_{MS}$  et des métriques de hauteur (modèles 20).*

Matériel	Modèle	R2 calib. [-]	R2 valid. [-]	RMSE calib. [kgMS/ha]	RMSE valid. [kgMS/ha]	rRMSE calib. [%]	rRMSE valid. [%]
MicaSense	Stepwise (6 var.)	0,685	0,334	756,99	964,05	41,1	35,3
	Forward (6 var.)	0,685	0,334	756,99	964,05	41,1	35,3
	Backward (8 var.)	0,713	0,273	691,26	1039,47	37,6	38,1
	PCR (ncomp=3)	0,660	0,368	804,87	943,93	43,7	34,6
	PLS (ncomp=3)	0,662	0,345	802,36	949,55	43,6	34,8
	RF (ntree=500 ; nsize= 5 ; mtry= 1)	0,551	0,106	925,63	1118,35	50,3	41,0
	SVM linéaire (C=5)	0,585	0,261	757,90	1063,56	41,2	39,0
	SVM radial (sigma= 0,075 ; C= 1)	0,490	0,0588	1002,15	1086,88	54,5	39,8