

---

**Reconnaissance automatisée du couvert foliaire d'une forêt semi-décidue  
d'Afrique centrale (Luki, République démocratique du Congo) sur base  
d'imagerie drone à très haute résolution.**

**Auteur :** Mackels, Matthias

**Promoteur(s) :** Plumacker, Antoine; Bastin, Jean-François

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

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

**Année académique :** 2024-2025

**URI/URL :** <http://hdl.handle.net/2268.2/24218>

---

**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.*

---

## Annexes

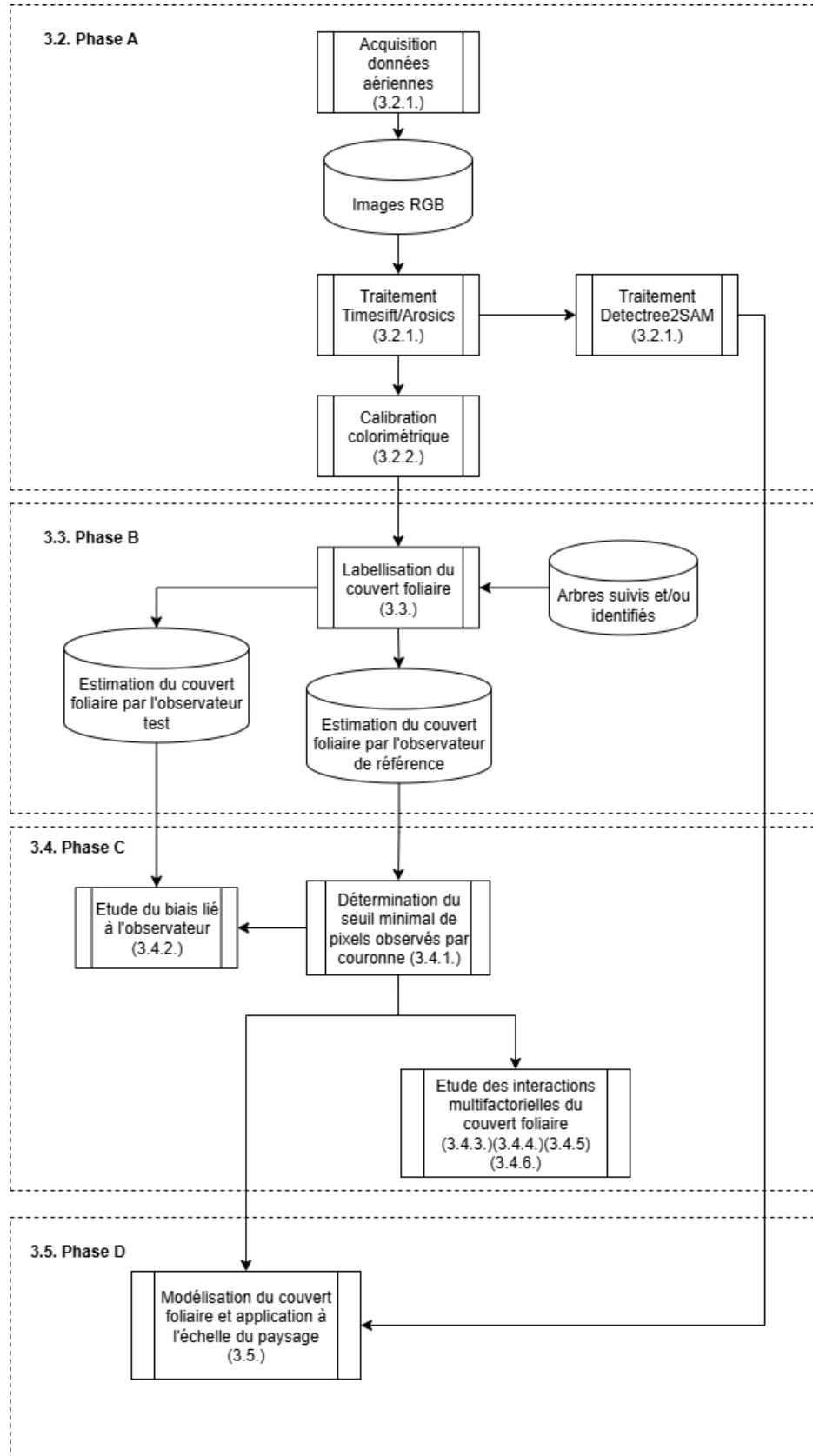


Figure 25 : Organigramme du flux de travail général

## Annexes

Date	Drone
21-04-23	DJI Mavic 2
04-05-23	DJI Mavic 2
18-05-23	DJI Mavic 2
03-06-23	DJI Mavic 2
16-06-23	DJI Mavic 2
29-06-23	DJI Mavic 2
31-07-23	DJI Mavic 2
11-08-23	DJI Mavic 2
26-08-23	DJI Mavic 2
13-09-23	DJI Mavic 2
01-11-23	DJI Mavic 2
24-06-24	DJI Mini 2
04-07-24	DJI Mini 2
18-07-24	DJI Mini 2
01-08-24	DJI Mini 2

Tableau 5 : Liste des dates et du drone utilisé pour l'acquisition des images.

## Annexes

Espèces	nb _individus
<i>Albizia conaria</i>	1
<i>Albizia gummiifera</i>	1
<i>Antiaris toxicaria</i>	3
<i>Antrocaryon nannanii</i>	1
<i>Canarium schweinfurthii</i>	1
<i>Ceiba pentandra</i>	1
<i>Celtis mildbraedii</i>	4
<i>Celtis soyauxii</i>	1
<i>Dacryodes buettneri</i>	12
<i>Desbordesia glaucescens</i>	3
<i>Dialium corbisieri</i>	3
<i>Dialium gossweileri</i>	1
<i>Dialium pachyphyllum</i>	1
<i>Entandrophragma angolense</i>	1
<i>Entandrophragma utile</i>	1
<i>Erythrophleum suaveolens</i>	1
<i>Ficus exasperata</i>	1
<i>Ficus zenkeri</i>	1
<i>Gambeya lacourtiana</i>	1
<i>Ganophyllum giganteum</i>	3
<i>Hexalobus crispiflorus</i>	1
<i>Holoptelea grandis</i>	2
<i>Hylocephalon gabunense</i>	1
<i>Irvingia grandifolia</i>	2
<i>Klainedoxa bugenii</i>	2
<i>Lannea welwitschii</i>	1
<i>Milicia excelsa</i>	2
<i>Musanga cecropioides</i>	3
NA	7
<i>Newtonia glandulifera</i>	4
<i>Ongokea gore</i>	1
<i>Parkia bicolor</i>	1
<i>Petersianthus macrocarpus</i>	2
<i>Piptadeniastrum africanum</i>	16
<i>Prioria balsamifera</i>	16
<i>Prioria oxyphylla</i>	4
<i>Pteleopsis hylodendron</i>	6
<i>Pycnanthus angolensis</i>	2
<i>Sterculia tragacantha</i>	2
<i>Terminalia superba</i>	32
<i>Zanha golungensis</i>	3

*Tableau 6 : Ensemble des individus par espèce présents dans l'étude possédant au moins 20 pixels observés par couronne*

## Annexes

indice	GCC	RCC	dH
moyenne	gcc_mean	rcc_mean	dH_mean
Médiane	gcc_median	rcc_median	
Écart interquartile	gcc_iqr	rcc_iqr	
Ecart Type	gcc_sd	rcc_sd	
Percentile 05	gcc_p05	rcc_p05	
Percentile 10	gcc_p10	rcc_p10	
Percentile 15	gcc_p15	rcc_p15	
Percentile 20	gcc_p20	rcc_p20	
Percentile 25	gcc_p25	rcc_p25	
Percentile 30	gcc_p30	rcc_p30	
Percentile 35	gcc_p35	rcc_p35	
Percentile 40	gcc_p40	rcc_p40	
Percentile 45	gcc_p45	rcc_p45	
Percentile 50	gcc_p50	rcc_p50	
Percentile 55	gcc_p55	rcc_p55	
Percentile 60	gcc_p60	rcc_p60	
Percentile 65	gcc_p65	rcc_p65	
Percentile 70	gcc_p70	rcc_p70	
Percentile 75	gcc_p75	rcc_p75	
Percentile 80	gcc_p80	rcc_p80	
Percentile 85	gcc_p85	rcc_p85	
Percentile 90	gcc_p90	rcc_p90	
Percentile 95	gcc_p95	rcc_p95	

Tableau 7 : Indices implémentés dans les modèles

Analyse	Canal	Test utilisé	Résultat brut	Résultat calibré	Interprétation
Normalité intra-date	B, G, R	Shapiro-Wilk (sur n = 1000)	Majorité des dates : $p < 0.05 \rightarrow$ non-normalité	Idem : non-normalité majoritaire	Pas de normalité des distributions → ANOVA non applicable
Homogénéité des variances	B, G, R	Fligner-Killeen	$p \approx 0$ pour tous les canaux	$p \approx 0$ pour tous les canaux	Variances hétérogènes persistantes
Différences inter-dates	B, G, R	Kruskal-Wallis	$p < 0.001$ (significatif)	G : $p = 0.026$ ; R : $p = 0.002$ ; B : $p = 0.24$	B devient homogène post-calibration, G et R restent différents

Tableau 8 : Résultats des analyses colorimétriques des différentes orthophotos et de leurs calibrations

## Annexes

date	canal	moyenne	ecart_type	moyenne_ref	ecart_type_ref	pente	intercept
21-04-23	b	192,04	21,01	181,06	14,57	0,69	47,91
	g	194,41	21,69	191,73	14,82	0,68	58,84
	r	214,19	21,04	211,28	14,65	0,70	62,13
04-05-23	b	180,27	14,62	181,06	14,57	1,00	1,42
	g	186,51	15,42	191,73	14,82	0,96	12,40
	r	205,42	16,69	211,28	14,65	0,88	30,98
03-06-23	b	188,24	12,91	181,06	14,57	1,13	-31,40
	g	189,07	14,21	191,73	14,82	1,04	-5,45
	r	210,22	14,67	211,28	14,65	1,00	1,37
16-06-23	b	182,65	13,90	181,06	14,57	1,05	-10,37
	g	188,77	13,36	191,73	14,82	1,11	-17,68
	r	205,74	13,17	211,28	14,65	1,11	-17,58
29-06-23	b	177,50	13,01	181,06	14,57	1,12	-17,70
	g	186,86	13,44	191,73	14,82	1,10	-14,45
	r	202,99	13,16	211,28	14,65	1,11	-14,77
31-07-23	b	175,84	12,99	181,06	14,57	1,12	-16,14
	g	181,25	13,21	191,73	14,82	1,12	-11,61
	r	194,17	12,76	211,28	14,65	1,15	-11,59
11-08-23	b	166,06	17,02	181,06	14,57	0,86	38,97
	g	178,97	17,81	191,73	14,82	0,83	42,73
	r	190,27	18,15	211,28	14,65	0,81	57,73
26-08-23	b	160,43	11,39	181,06	14,57	1,28	-24,12
	g	178,41	12,28	191,73	14,82	1,21	-23,61
	r	188,54	12,60	211,28	14,65	1,16	-7,99
13-09-23	b	166,79	12,32	181,06	14,57	1,18	-16,12
	g	177,63	12,69	191,73	14,82	1,17	-15,71
	r	187,91	12,39	211,28	14,65	1,18	-10,94
01-11-23	b	138,21	29,52	181,06	14,57	0,49	112,87
	g	143,19	31,21	191,73	14,82	0,47	123,72
	r	156,35	32,36	211,28	14,65	0,45	140,50
24-06-24	b	181,63	14,69	181,06	14,57	0,99	1,00
	g	179,74	15,79	191,73	14,82	0,94	23,02
	r	197,28	17,46	211,28	14,65	0,84	45,77
04-07-24	b	171,69	16,92	181,06	14,57	0,86	33,24
	g	180,65	16,53	191,73	14,82	0,90	29,77
	r	196,07	18,40	211,28	14,65	0,80	55,20
18-07-24	b	183,15	15,89	181,06	14,57	0,92	13,20
	g	182,54	18,45	191,73	14,82	0,80	45,11
	r	197,69	20,19	211,28	14,65	0,73	67,82
01-08-24	b	174,77	19,08	181,06	14,57	0,76	47,61
	g	177,94	22,60	191,73	14,82	0,66	75,01
	r	187,04	25,26	211,28	14,65	0,58	102,81

Tableau 9 : valeurs nécessaires au calcul de la calibration colorimétrique

## Annexes

Comparaison	Z-score	p-value (brute)	p-value (ajustée)	Significatif (5%)
1-4 vs 100+	9.36	7.79e-21	< 0.001	***
5-9 vs 100+	5.87	4.24e-09	< 0.001	***
10-14 vs 100+	4.17	3.02e-05	0.005	***
15-19 vs 100+	1.88	6.00e-02	1.000	Non
20-24 vs 100+	0.37	7.10e-01	1.000	Non
25-29 vs 100+	1.34	1.79e-01	1.000	Non
30-34 vs 100+	0.78	4.34e-01	1.000	Non
35-39 vs 100+	1.44	1.51e-01	1.000	Non
40-44 vs 100+	0.75	4.54e-01	1.000	Non
45-49 vs 100+	0.68	4.97e-01	1.000	Non
50-54 vs 100+	0.22	8.23e-01	1.000	Non
55-59 vs 100+	-0.51	6.08e-01	1.000	Non
60-64 vs 100+	2.49	1.26e-02	1.000	Non
65-69 vs 100+	0.29	7.68e-01	1.000	Non
70-74 vs 100+	2.92	3.55e-03	1.000	Non
75-79 vs 100+	1.15	2.52e-01	1.000	Non
80-84 vs 100+	1.68	9.21e-02	1.000	Non
90-94 vs 100+	-2.19	2.82e-02	1.000	Non

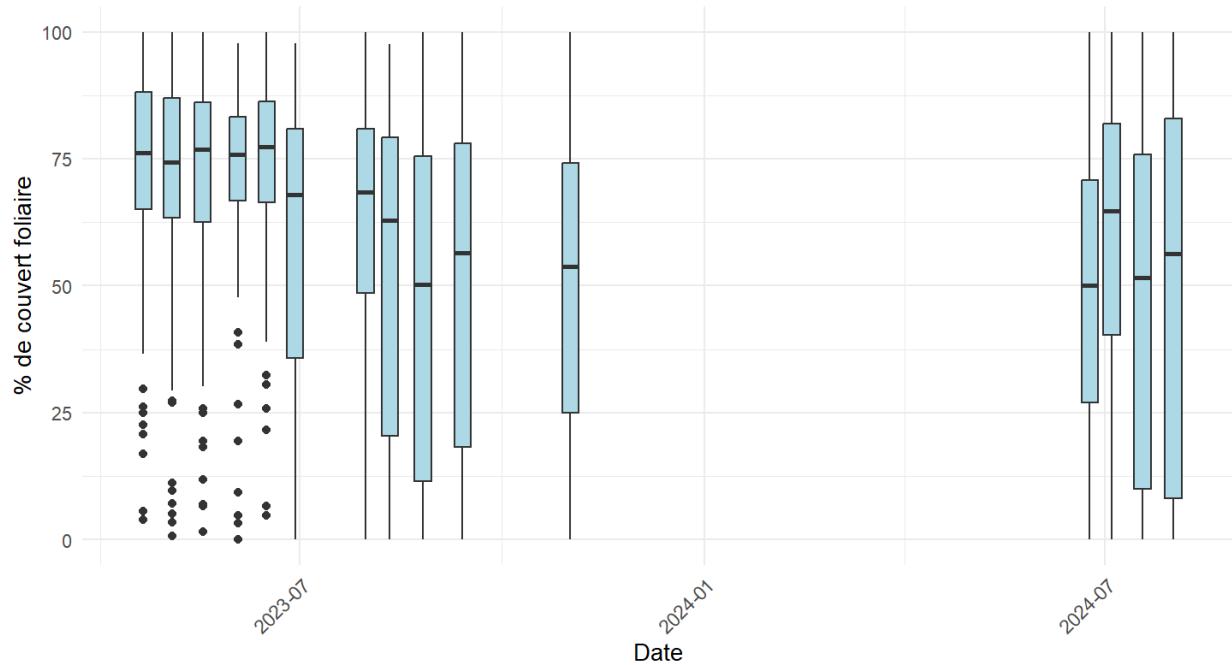
Tableau 10 : Résultats des tests Post-hoc avec la correction de Bonferroni concernant la comparaison de variance entre les différentes classes de point d'échantillonnage par couronne

## Annexes

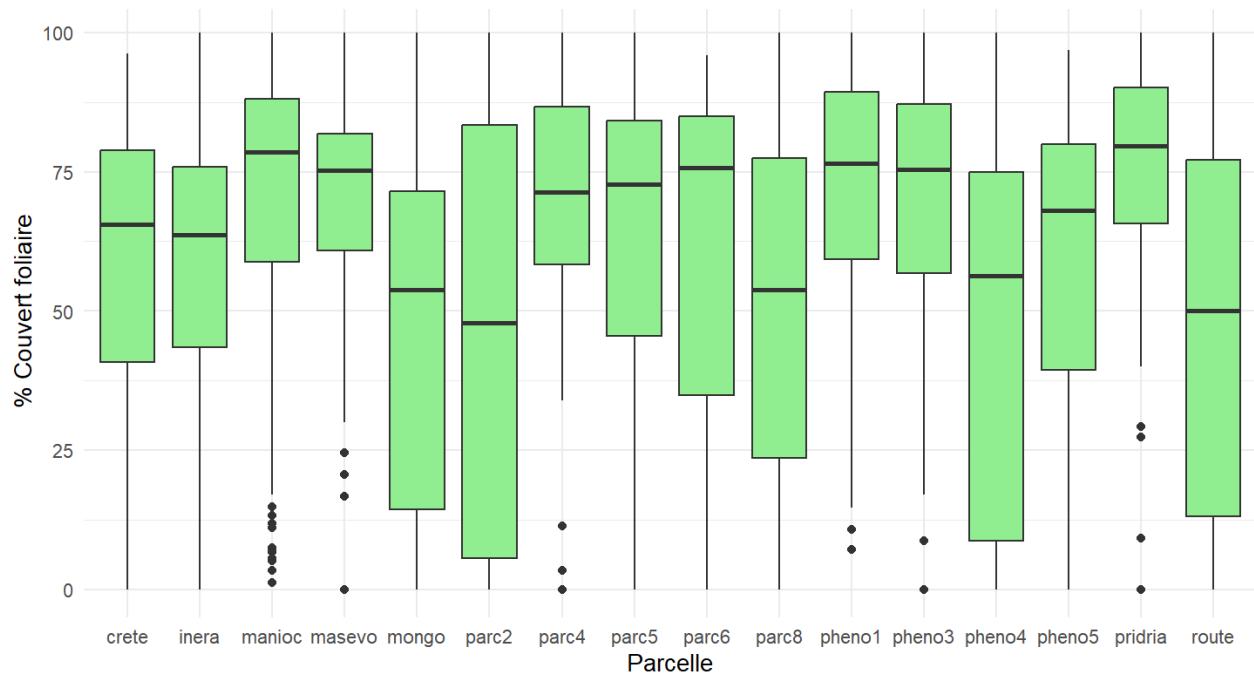
Seuil (n points)	Moyenne (%)	Écart-type (%)	IQR (%)
5	61.3	30.4	40.0
10	61.3	27.6	30.0
15	61.4	26.4	33.3
20	61.5	25.9	30.0
25	61.4	25.6	32.0
30	61.4	25.4	30.0
35	61.3	25.1	31.4
40	61.3	25.0	30.0
45	61.3	24.9	31.1
50	61.3	24.9	30.0
55	61.4	24.8	29.1
60	61.4	24.7	30.0
65	61.3	24.7	29.2
70	61.4	24.6	30.0
75	61.4	24.6	29.3
80	61.3	24.6	28.8
85	61.4	24.5	29.4
90	61.3	24.5	27.8
95	61.4	24.5	28.4
100	61.3	24.5	28.0

Tableau 11 : Résumé des estimations bootstrap du couvert foliaire par taille d'échantillon

## Annexes



*Figure 26 : Boxplot du couvert foliaire (%) sur l'ensemble de la série temporelle échantillonnée*



*Figure 27 : Boxplot du couvert foliaire (%) par parcelle sur l'ensemble de la série temporelle échantillonnée*

## Annexes

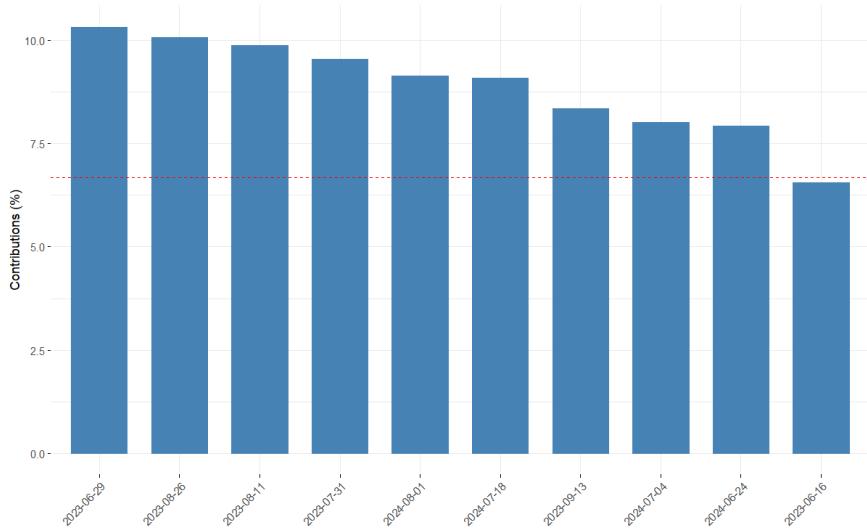


Figure 28 : Histogramme de la contribution des variables à la dimension 1 de l'ACP

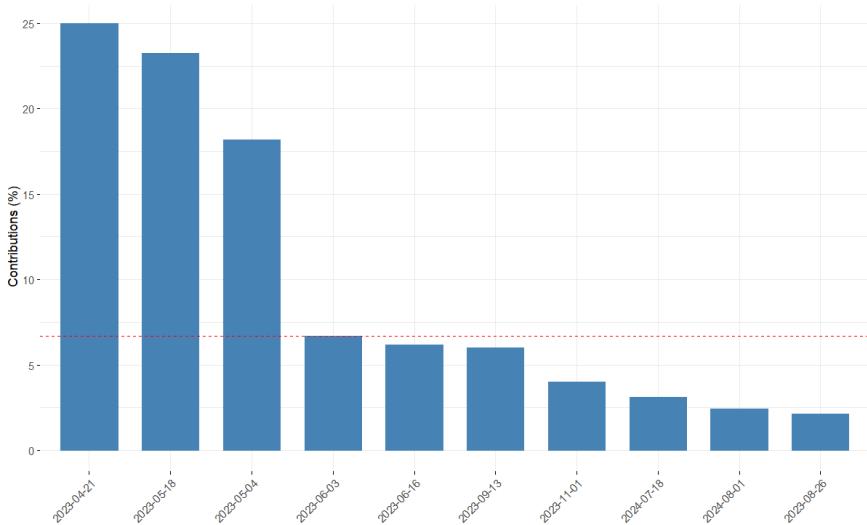


Figure 29 : Histogramme de la contribution des variables à la dimension 2 de l'ACP

## Annexes

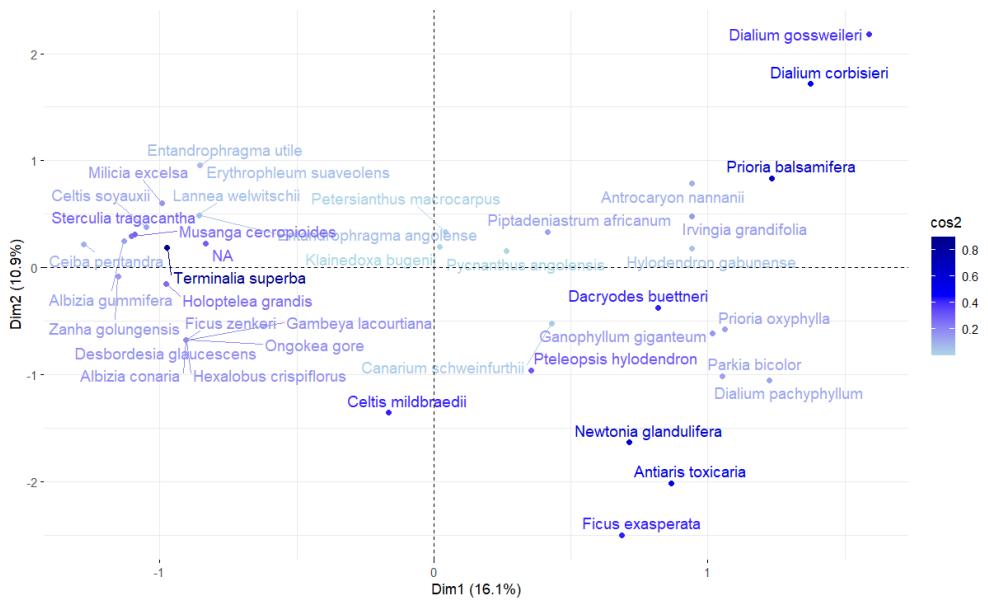


Figure 30 : Projection des espèces étudiées selon les 2 dimension de l'analyse de correspondance et la valeur du  $\cos^2$  associée

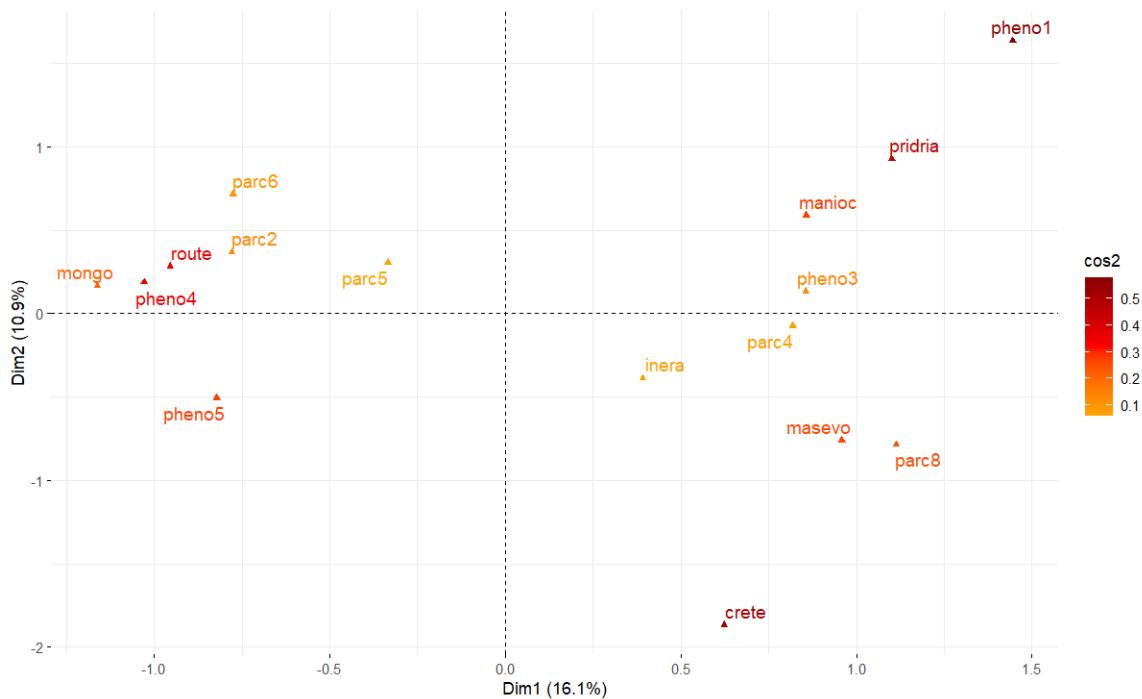


Figure 31 : Projection des parcelles étudiées selon les 2 dimension de l'analyse de correspondance et la valeur du  $\cos^2$  associée

Annexes

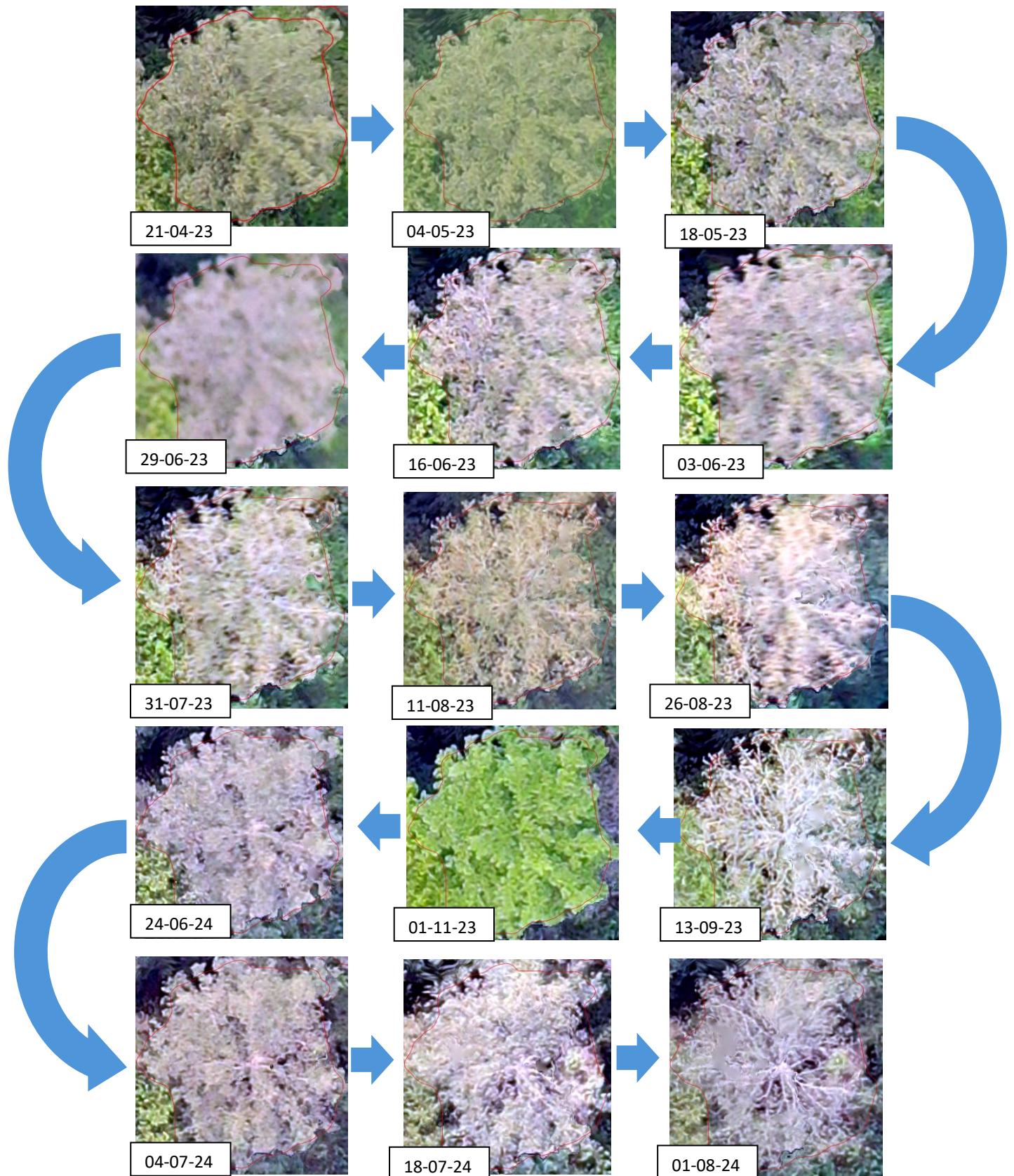


Figure 30 : Suivi date par date de l'individu 19