

UNIVERSITÉ CHEIKH ANTA DIOP DE DAKAR

Faculté des Sciences et Techniques

Département de Biologie Végétale



**L'impact de la distance des arbres sur certains paramètres de la végétation
herbacée dans un écosystème sahélien : approche par Drone.**

Mémoire présenté et soutenu le 06 juillet 2022 au département de Biologie Végétale pour
l'obtention du diplôme de :

Master en Agroforesterie, Ecologie et Adaptation (AFECA)

Par **Fréjuste Joseph Cofélas Fassinou**

Devant le jury composé de :

Président :	Daouda NGOM	Professeur titulaire	BV/FST/UCAD
Membres :	Sékouna DIATTA	Maitre-assistant	BV/FST/UCAD
	Simon TAUGOURDEAU	Chercheur	UMR SELMET/CIRAD
	Alain AUDEBERT	Chercheur	UMR AGAP/CIRAD
	Moustapha BASSIMBE	Maitre-assistant	BV/FST/UCAD

Encadrants : Simon TAUGOURDEAU, Chercheur, UMR SELMET/CIRAD

Sékouna DIATTA, Maitre-assistant, BV/FST/UCAD

Dédicace

A tous ceux qui savent manifester du bon cœur pour de bonnes causes.

Remerciements

Mes sincères remerciements vont à l'endroit de tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce document.

Je tiens d'abord à remercier :

- Le CERAAS (Centre Régional pour l'Amélioration de l'Adaptation à la Sécheresse) et le DAAD (Service d'Echange Universitaire Allemand) pour m'avoir donné l'opportunité de m'inscrire à l'Université Cheikh Anta Diop (UCAD) de Dakar.
- L'UCAD pour avoir accepté mon inscription et m'avoir permis de bénéficier du programme du master Agroforesterie, Ecologie et Adaptation (AFECA).

Ce document n'aurait pas connu pareil aboutissement sans l'appui moral, intellectuel et matériel de certaines personnes auxquelles je témoigne ici ma profonde gratitude. Je tiens à remercier en particulier :

- Professeur Daouda NGOM, pour avoir accepté présider le jury de soutenance ;
- Dr Sékouna Diatta pour nous avoir chaleureusement accueillis et épaulés tout au long de notre séjour ; et aussi pour avoir accepté l'encadrement de ce travail malgré ses multiples occupations ;
- Dr Simon Taugourdeau pour avoir encadré cette étude avec attention, intérêt et disponibilité et ce en dépit de ses multiples occupations. Recevez ici toute ma profonde gratitude ;
- Dr Alain AUDEBERT et Dr Moustapha BASSIMBE qui ont bien voulu sacrifier de leur précieux temps pour apprécier notre travail ;
- Mlle Ange N'Goran, Dr Ousmane Ndiaye qui ont su mettre en œuvre leur disponibilité et leur dynamisme pour encadrer et diriger ce stage et pour leurs divers apports dans la réalisation de ce document ;
- Dr Ousmane Diatta pour sa disponibilité, sa franche collaboration sur le terrain et ses divers apports dans la réalisation de ce document ;
- M. Ulrich Agbohessou pour sa disponibilité et ses divers apports dans la réalisation de ce document ;
- M. Antoine Diédhiou, M. Mamadou Gassama, M. Moustapha Dia, M. Ameth Ndiaye pour leur disponibilité et leur franche collaboration sur le terrain ;
- Le personnel enseignant du master AFECA pour toutes les connaissances qu'ils m'ont transmises durant ces deux années de formation et pour leurs multiples conseils.
- Le personnel du Pôle Pastoralisme et Zones Sèches (PPZS) et du Centre de Recherches Zootechniques (CRZ) de Dahra pour leur accueil et encadrement durant mon stage ;

- Le projet CaSSECS, dans le cadre duquel se sont déroulés ces travaux de recherche ;

Je tiens également à remercier :

- Tous mes camarades du master AFECA de la promotion 2019, pour l'ambiance conviviale qui a régné en notre sein ;
- Mes compatriotes Rabiath Adigoun, Gildas Bokossa, Boris Dossounon pour leur soutien.

Toute ma famille et en particulier mon père, ma sœur, mon frère et mon oncle ZANNOU Octave pour leur soutien, leurs conseils et leurs encouragements.

Table des matières

Dédicace	i
Remerciements	ii
Table des matières	iv
Liste des figures	vi
Liste des tableaux	viii
Liste des sigles et abréviations	ix
Abstract	x
Résumé	x
Introduction	1
1.Synthèse bibliographique	4
1.1. Description du milieu d'étude	4
1.1.1.Climat	5
1.1.2.Végétation	5
1.1.3.Pédologie	5
1.2.Impact des arbres sur la strate herbacée	7
1.3.Usages des drones en Afrique	8
1.3.1 Types de drones.....	8
1.3.3.Applications civiles de la technologie des drones.....	10
2.Matériel et méthodes	12
2.1.Relevés sur la végétation herbacée.....	12
2.2.Acquisition d'images géospatiales par drone	13
2.3.Traitement des données	14
2.3.1. Calibration entre les données du drone et les paramètres de la strate herbacée mesurés sur le terrain.....	17
2.3.2. Etude de la dynamique de la biomasse du couvert herbacé par SfM.....	17
2.3.3. Etude de la distance d'influence des arbres sur la variation du couvert herbacé	18
3.Résultats	18

3.1. Calibration entre les données du drone et les paramètres de la strate herbacée mesurés sur le terrain.....	18
3.1.1. Phytomasse fraîche.....	19
3.1.2. Phytomasse sèche.....	20
3.1.3. Taux de recouvrement.....	21
3.1.4. Taux de feuillaison.....	22
3.1.5. Taux de floraison.....	23
3.1.6. Taux de senescence.....	24
3.2. Etude de la dynamique de la biomasse du couvert herbacé par SfM.....	25
3.3. Etude de la distance d'influence des arbres sur la variation du couvert herbacé.....	32
4. Discussion.....	39
5.1 Calibration entre les données du drone et les paramètres de la strate herbacée mesurés sur le terrain.....	39
4.2. Etude de la dynamique de la biomasse du couvert herbacé par SfM.....	40
4.3. Etude de la distance d'influence des arbres sur la variation du couvert herbacé.....	41
Conclusion.....	42
Perspectives.....	43
Références.....	44

Liste des figures

Figure 1: Localisation et plan du CRZ de Dahra (Sow et <i>al.</i> , 1988 modifié)	4
Figure 2: Les différentes unités pédologiques du CRZ (Ndiaye, 2015)	6
Figure 3: Drone Anafi de la marque Parrot.....	10
Figure 4: Positionnement des quadrats	13
Figure 5: Dispositif expérimental.....	13
Figure 6 : Interface de l'application PIX4D Capture montrant les paramétrages du vol de drone	14
Figure 7 : Principe de fonctionnement de la photogrammétrie (Bossoukpe, 2020).....	15
Figure 8: Analyse d'images sur PIX4D Mapper.....	15
Figure 9: Graphique de la régression stepwise sur la phytomasse fraîche du 19 juillet au 17 septembre 2020 dans un écosystème sahélien.....	20
Figure 10: Graphique de la régression stepwise sur la phytomasse sèche du 19 juillet au 17 septembre 2020 dans un écosystème sahélien.....	21
Figure 11: Graphique de la régression stepwise sur le recouvrement de la végétation herbacée du 19 juillet au 17 septembre 2020 dans un écosystème sahélien.	22
Figure 12 : Graphique de la régression stepwise sur le taux de feuillaison du 19 juillet au 17 septembre 2020 dans un écosystème sahélien.....	23
Figure 13 : Graphique de la régression stepwise sur le taux de floraison du 19 juillet au 17 septembre 2020 dans un écosystème sahélien.....	24
Figure 14 : Graphique de la régression stepwise sur le taux de sénescence du 19 juillet au 17 septembre 2020 dans un écosystème sahélien.....	25
Figure 15 : Carte de phytomasse sèche du 5/09/2020 de la parcelle d'expérimentation au CRZ de Dahra	26
Figure 16 : Dynamique de la phytomasse sèche au sein des quadrats fauchés le 31/07/2020	27
Figure 17 : Dynamique de la phytomasse sèche au sein des quadrats fauchés le 30/08/2020	28
Figure 18 : Dynamique de la phytomasse sèche au sein des quadrats fauchés le 09/09/2020	28
Figure 19 : Dynamique naturelle de la phytomasse sèche au sein de BC et DC.	29
Figure 20 : Comparaison entre BC et DC sur trois périodes de la saison	30
Figure 21 : Dynamique de la phytomasse sèche au niveau de <i>Vachellia tortilis</i> dans un écosystème sahélien	31
Figure 22 : Dynamique de la phytomasse sèche au niveau de <i>Balanites aegyptiaca</i> dans un écosystème sahélien	31

Figure 23 : Comparaison de la phytomasse à la limite de la couronne et distante de la couronne au niveau de <i>Balanites aegyptiaca</i> et <i>Vachellia tortillis</i> en début de saison pluvieuse dans un écosystème sahélien.	33
Figure 24 : Comparaison de la phytomasse à la limite de la couronne et distante de la couronne au niveau de <i>Balanites aegyptiaca</i> et <i>Vachellia tortillis</i> en milieu de saison pluvieuse dans un écosystème sahélien	34
Figure 25 : Comparaison de la phytomasse à la limite de la couronne et distante de la couronne au niveau de <i>Balanites aegyptiaca</i> et <i>Vachellia tortillis</i> vers fin de saison pluvieuse dans un écosystème sahélien	34
Figure 26 : Construction du variogramme expérimental : cas de la carte de biomasse du 15/09/2020.....	35
Figure 27 : Variogrammes directionnels, pour les quatre directions des arbres : cas de la carte de biomasse du 15/09/2020 d'un écosystème sahélien	36
Figure 28 : Variogrammes de la phytomasse pour chaque date de vol.....	37
Figure 29 : Variation de la distance d'influence de l'arbre durant la saison	38

Liste des tableaux

Tableau 1: Classification des drones par poids et par tailles (UA et NEPAD, 2019).....	8
Tableau 2 : Indices de végétation.....	16
Tableau 3 : Variables extraites des cartes 3D	16
Tableau 4: Paramètres dendrométriques des arbres du site	18
Tableau 5 : Régression stepwise sur la phytomasse fraîche	19
Tableau 6 : Régression stepwise sur la phytomasse sèche.....	20
Tableau 7 : Régression stepwise sur le recouvrement de la strate herbacée.....	21
Tableau 8 : Régression stepwise sur le taux de feuillaison.....	22
Tableau 9 : Régression stepwise sur le taux de floraison	23
Tableau 10 : Régression stepwise sur le taux de senescence	24
Tableau 11 : Tableau récapitulatif de la calibration sur la variation des paramètres de la strate herbacée.....	25

Liste des sigles et abréviations

- 3D : Trois (03) dimensions
- AFECA : Agroforesterie, Ecologie et Adaptation
- AIC : Akaike Information Criterion
- ASP : Aéronef Sans Pilote
- CaSSECS : Carbon Sequestration and greenhouse gas emissions in (agro) Sylvopastoral Ecosystems in the sahelian CILSS States
- CERAAS : Centre Régional pour l'Amélioration de l'Adaptation à la Sécheresse
- CRZ : Centre de Recherches Zootechniques
- CSV : Comma-Separated Values
- DAAD : Service d'Echange Universitaire Allemand
- DSM : Digital Surface Model
- EXG : Excess of green
- GLI : Green Leaf Index
- NDBGI : Normalized Difference Blue Green Index
- NDBRI : Normalized Difference Blue Red Index
- NDGRI : Normalized Difference Green Red Index
- NDVI : Normalized Difference Vegetation Index
- NEPAD : Nouveau partenariat pour le développement de l'Afrique
- PPZS : Pôle Pastoralisme et Zones Sèches
- QGIS : Quantum Geographic Information System
- RVB : Rouge Vert Bleu
- SfM : Structure from Motion
- UA : Union Africaine
- UCAD : Université Cheikh Anta Diop
- VARI : Visible Atmospheric Resistant Index

Abstract

Sahelian savannah is composed of an annual herbaceous layer and a sparse tree community. The tree has a strong impact on the biomass and the species composition of the herbaceous layer due to microclimate and increase in fertility. In this work, we evaluated the distance of the tree impact on the herbaceous layer. We used an RGB UAV to produce biomass map and then evaluated the distance of the tree impacts. In 2020 in a rangeland in northern Senegal, three grass measurements were made every two days during the growth season combined with a UAV flight made with a parrot Anafi drone. At each date, we produced a biomass map and evaluated the distance of the tree impact using geostatic method. We obtained a calibration between UAV and herbaceous parameters variation measured on the field. The impacts of the tree were ranging from 5 m in the beginning of the wet season to 15 m at the end of the wet season. This work showed the distance of the tree impact on the grass layer in savannah. The evaluation of this impact could be helpful for the management of the tree layers to increase the quantity of grass for the pastoralism.

Keywords: UAV, savannah, tree impacts, biomass, grass, Sahel.

Résumé

La savane sahélienne est composée d'une couche herbacée annuelle et d'une communauté d'arbres épars. L'arbre a un fort impact sur la biomasse et la composition spécifique des espèces herbacées en raison du microclimat et de l'augmentation de la fertilité. Dans ce travail, nous avons évalué la distance de l'impact de l'arbre sur la strate herbacée. Nous avons utilisé un drone RVB pour produire des cartes de la biomasse et puis avons évalué la distance de l'impact des arbres. En 2020, dans un parcours du nord du Sénégal, trois mesures d'herbe ont été effectuées tous les deux jours pendant la saison de croissance, combinées à un vol de drone effectué avec un Parrot Anafi. A chaque date, nous avons produit une carte de biomasse et évalué la distance de l'impact de l'arbre en utilisant une méthode géostatique. Nous avons obtenu une calibration entre le drone et les paramètres de la végétation mesurés sur le terrain. Les impacts de l'arbre étaient de 5 m en début de saison humide et 15 m en fin de saison humide sur la phytomasse sèche dans la parcelle étudiée. Ce travail montre la distance de l'impact de l'arbre sur la strate herbacée en savane. L'évaluation de cet impact pourrait aider à la gestion des strates arborées afin d'augmenter la quantité d'herbe pour le pastoralisme.

Mots clés : Drone RVB, savane sahélienne, biomasse, dynamique de la strate herbacée, impact des arbres.

Introduction

Les savanes, qui couvrent des millions de km², principalement en Afrique, en Amérique du Sud, en Australie, sont des écosystèmes mixtes bois-prairie, où les arbres sont souvent clairsemés et la couverture végétale faible. Il y coexiste donc deux strates: une strate herbacée avec des espèces annuelles ou pérennes et une strate ligneuse avec des arbres et des arbustes (Akpo et *al.*, 2003; Hiernaux, 2006). En Afrique, ces phytocénoses représentent 50% de la surface continentale (Olson et *al.*, 2001) et occupent une place importante dans la vie des populations (Akpo et *al.*, 2003 ; Lykke et *al.*, 2004 ; Billen, 2016).

Dans la région du sahel, s'étend un grand territoire à vocation pastorale où cette végétation naturelle constitue la principale source d'alimentation du bétail. Elle est également utilisée comme complément alimentaire, bois de chauffage, bois d'œuvre et comme médicaments par la population locale (Lykke et *al.*, 2004 ; Ndiaye, 2015 ; Billen, 2016). Le climat y est rude, caractérisé par une saison sèche intense qui s'étendant sur huit (08) à neuf (09) mois secs et une saison des pluies concentrée sur trois (03) à quatre (04) mois dans l'année. La pluviométrie se situe entre les isohyètes 100 et 500 mm. La température moyenne mensuelle est généralement élevée et varie entre 18° C en janvier et 40° C en mai (Diallo et *al.*, 2017). Cette péjoration des conditions climatiques, aggravée par les différences de compositions des sols et les facteurs anthropiques soumet les écosystèmes sahéliens à un processus continu de dégradation (Grouzis et *al.*, 1991 ; Ndiaye et *al.*, 2014 ; Niang et *al.* , 2014 ; Diallo et *al.*, 2017).

La complexité de la gestion de ces écosystèmes sahéliens découle donc de la difficulté d'appréhender le fonctionnement des différentes strates qui les composent et leur dynamique sur une grande surface et pendant une période suffisamment longue. Des investigations ont été ainsi menées sur l'inventaire floristique, la typologie, la pédologie et la cartographie de ces écosystèmes (Audry, 1962 ; Leprun, 1971 ; Barry et *al.*, 1983; Barral, 1983; Grouzis et *al.*, 1988 ; Ndiaye, 2015 ; Billen, 2016 ; Diallo et *al.*, 2017 ; Bassène et *al.*, 2020). Le déterminisme hydrique, les conditions édapho-climatiques, les fluctuations spatio-temporelles des cycles de production, certains mécanismes de la mise en place des peuplements herbacés sont autant d'éléments considérés comme déterminant la variation de la structure spécifique du milieu (Grouzis et *al.*, 1991). La phénologie des ligneux a été étudiée (Grouzis et Scot, 1980) et des modèles d'estimation du potentiel fourrager des pâturages ont été développés (Toutain et

Lhoste, 1978 ; Rambal et Cornet, 1982 ; de Vries et Djiteye, 1982 ; Hiernaux, 1984 ; Saidou et *al.*, 2010 ; Ngom et *al.*, 2012).

Toutefois, le problème principal dans la région du Sahel demeure la reconstitution des écosystèmes dégradés et celle-ci doit prendre en compte l'intégration du ligneux dans le couvert végétal en raison de sa moins grande sensibilité aux perturbations de l'environnement (Menaut, 1983 ; Grouzis et *al.*, 1991). Plusieurs chercheurs ont montré que l'arbre améliore les conditions physiques du milieu et impacte positivement le fonctionnement et la structure du couvert herbacé (Sanchez 1987 ; Grouzis et *al.*, 1991 ; Akpo, 1993 ; Akpo et *al.*, 1997 ; Akpo et *al.*, 2003). Mais les connaissances sur la distance d'influence de l'arbre dans les écosystèmes sahéliens sont peu explorées. Evaluer cette distance permettrait de mieux appréhender le rôle de la strate ligneuse dans le milieu, de contrôler sa densité afin d'assurer une meilleure stabilité de l'écosystème et d'agir sur le disponible fourrager herbacé essentiel dans la vie des populations sahéliennes.

Cela nécessite une connaissance de l'écosystème à l'échelle spatiale et temporelle rapprochée associée aux rythmes de croissance de la strate herbacée et aux interactions entre les arbres et les herbes. Les informations nécessaires requises sont très complexes et doivent être précises, géolocalisées et à jour apparaissant donc difficile de recueillir uniquement avec des mesures in-situ. Cette réflexion met en évidence l'intérêt de la télédétection par drone comme outil pouvant être valorisé pour répondre à cette préoccupation.

Le drone ou Aéronef Sans Pilote (ASP) est un système aérien sans pilote doté de nombreux capteurs lui conférant une certaine autonomie, la capacité de se localiser et d'appréhender son environnement. Equipé des capteurs appropriés, le drone peut produire des images géospatiales à très haute résolution et fournir des données de télédétection en temps réel sur le terrain et aux intervalles de temps voulus à moindre coût, comparativement aux satellites (UA et NEPAD, 2019). Les méthodes de télédétection par drone permettent d'acquérir un signal (rayonnement électromagnétique réfléchi) transformé en image mettant en relation les composantes biophysiques du paysage avec les propriétés optiques (visible ou proche infrarouge) et thermiques des images obtenues (Berni et *al.*, 2009). Avec les récentes améliorations, les algorithmes d'appariements d'images sur base de points caractéristiques et les techniques de Structure-from-Motion (S-f-M, reconstruction d'une structure en 3D à partir d'images acquises en 2D) permettent de reconstruire les éléments du paysage à large échelle et de mesurer les paramètres de structure de la végétation sans avoir une grande expertise (Tang

et Shao, 2015 ; Quentin et *al.*, 2019). Cette facilité et cette vitesse d'acquisition des données font du drone un outils efficace permettant de s'affranchir en partie d'une certaine pénibilité liée aux mesures de terrain.

La démarche de cette étude porte sur une approche drone et la géostatistique pour étudier l'impact de l'arbre sur la strate herbacée dans les écosystèmes sahéliens. Les travaux se concentrent spécifiquement sur : la calibration entre les données du drone et les paramètres de végétation mesurés sur le terrain ; l'étude de la dynamique de la biomasse du couvert herbacé par SfM ; l'étude de la distance d'influence des arbres sur la variation du couvert herbacé.

La rédaction de ce document est faite en quatre parties. La première est consacrée essentiellement à la revue de littérature. Elle présente une synthèse des recherches effectuées sur les axes thématiques de l'étude. La deuxième partie, traite de la méthodologie adoptée. La troisième partie expose les résultats. La dernière partie confronte et discute nos résultats avec d'autres résultats d'études publiés.

1.Synthèse bibliographique

1.1. Description du milieu d'étude

Cette étude a été menée au Centre de Recherches Zootechniques (CRZ) de Dahra, situé approximativement à 15°21 de latitude Nord et à 15°28 longitude Ouest. Localisé dans la zone sylvopastorale du Sénégal plus connue sous le nom du Ferlo, Dahra est une commune du département de Linguère, limité au Nord par la commune de Kamb et au Sud par celle de Thiamène.

Le Centre de Recherches Zootechniques couvre une superficie de 6 800 ha, se répartissant en deux parties juxtaposées : la petite concession de 900 ha qui abrite les bâtiments techniques, administratifs et les logements du personnel et la grande concession de 5 900 ha qui constituait jusqu'au début des années 90 la zone de pâturage extensif comprenant 19 parcelles (Raynal, 1964 ; Ndiaye, 2015).

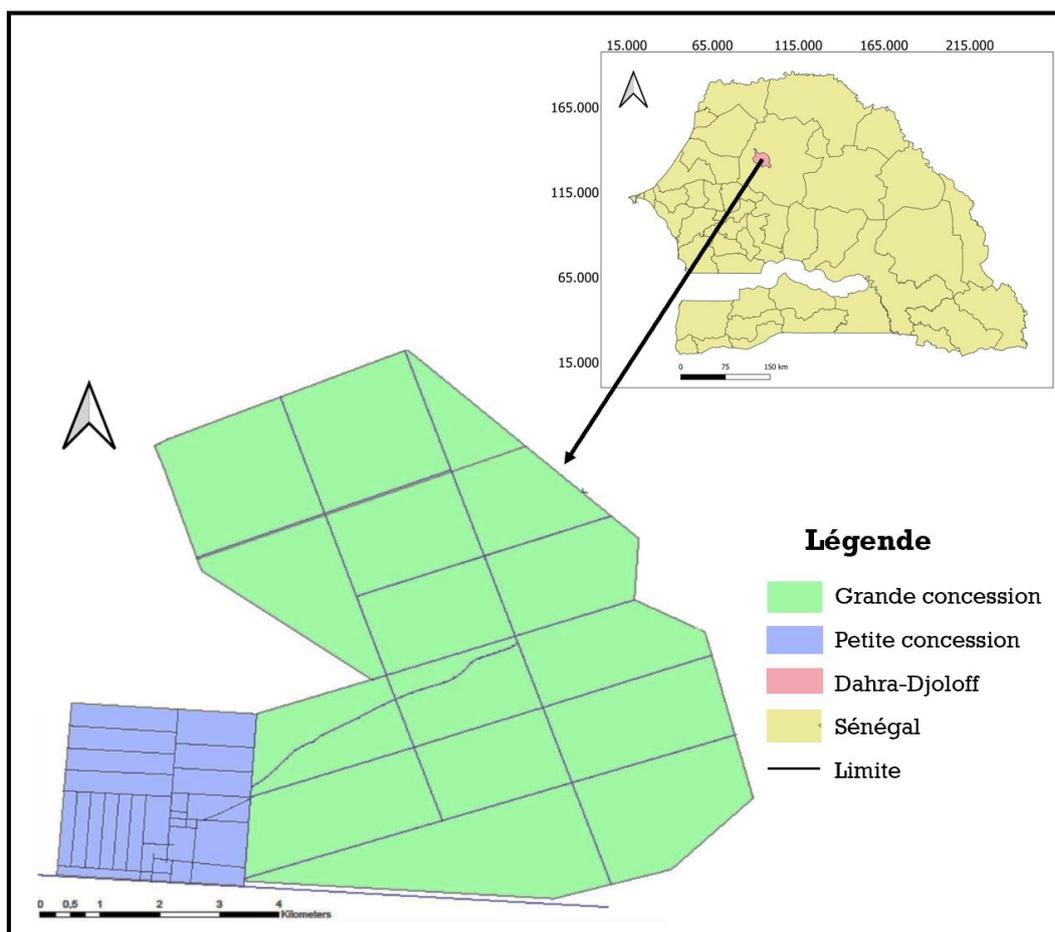


Figure 1: Localisation et plan du CRZ de Dahra (Sow et *al.*, 1988 modifié)

1.1.1.Climat

Le climat de la région du Ferlo est de type sahélien caractérisé par deux saisons bien distinctes : une saison sèche de neuf mois et une saison des pluies sur une période de 3 mois (Ndiaye et *al.*, 2014a). Les précipitations annuelles totales sont à la fois faibles et très variables, avec une moyenne de 422,6 mm par an de 1951 à 2004, mais avec un écart type de 126,8 mm par an. La température annuelle moyenne oscille autour de 27,7° C et fluctue entre une moyenne maximale de 30,2° C au mois d'octobre et un minimum de 24,5° C au mois de janvier (Ndiaye et *al.*, 2014a).

1.1.2.Végétation

La végétation du CRZ est une steppe à épineux (*Vachellia sp* surtout) très liée au sol et à la pluviométrie. Le tapis herbacé composé principalement de graminées annuelles est abondant sur dune de sable. La strate ligneuse y est très peu développée. Dans les dépressions, la strate ligneuse est caractérisée par un peuplement dense parsemé d'une végétation herbacée surtout représentée par des graminées pérennes (Ndiaye, 2015).

Cette production primaire, sous l'influence de la saison, constitue la principale source d'alimentation du bétail. Le disponible fourrager varie en quantité et en qualité tout au long de l'année. Sur une partie de la saison des pluies (septembre-octobre), la végétation herbacée est abondante et de meilleure qualité nutritive par rapport au reste de la saison sèche. En saison sèche l'apport des ligneux compense quelque peu la pauvreté des pâturages herbacés (Ndiaye, 2015).

1.1.3.Pédologie

Cinq unités pédologiques sont distinguées au CRZ de Dahra (Audry,1962 ; Sow et *al.*, 1988 ; Ndiaye, 2015). Il s'agit de :

- sols diors localisés dans la partie Nord, centre et Sud-Ouest ;
- sols brun-rouges situés à l'Est, au Nord-est et au Sud- Ouest ;
- complexe ferrugineux-calcimorphe des zones sableuses à calottes calcaires, dans la partie Nord, Centre, Sud et Sud-Est ;
- sols ferrugineux tropicaux à drainage moyen ou médiocre, localisés essentiellement au Sud et Sud-Ouest ;
- complexe mal drainé des bas-fonds et mares temporaires, plus présent dans la partie Sud, Sud-Est et Centre.

Toutefois, selon leurs propriétés physiques et chimiques, les sols du centre peuvent être regroupés en trois grands ensembles pédologiques :

- formations sableuses d'origine éolienne, qui sont dominantes ;
- formations détritiques sur grès ou latérite ;
- formations fluviatiles ou lacustres.

Ils constituent une succession de dunes de sables et de dépressions argileuses ou limono-argileuses.

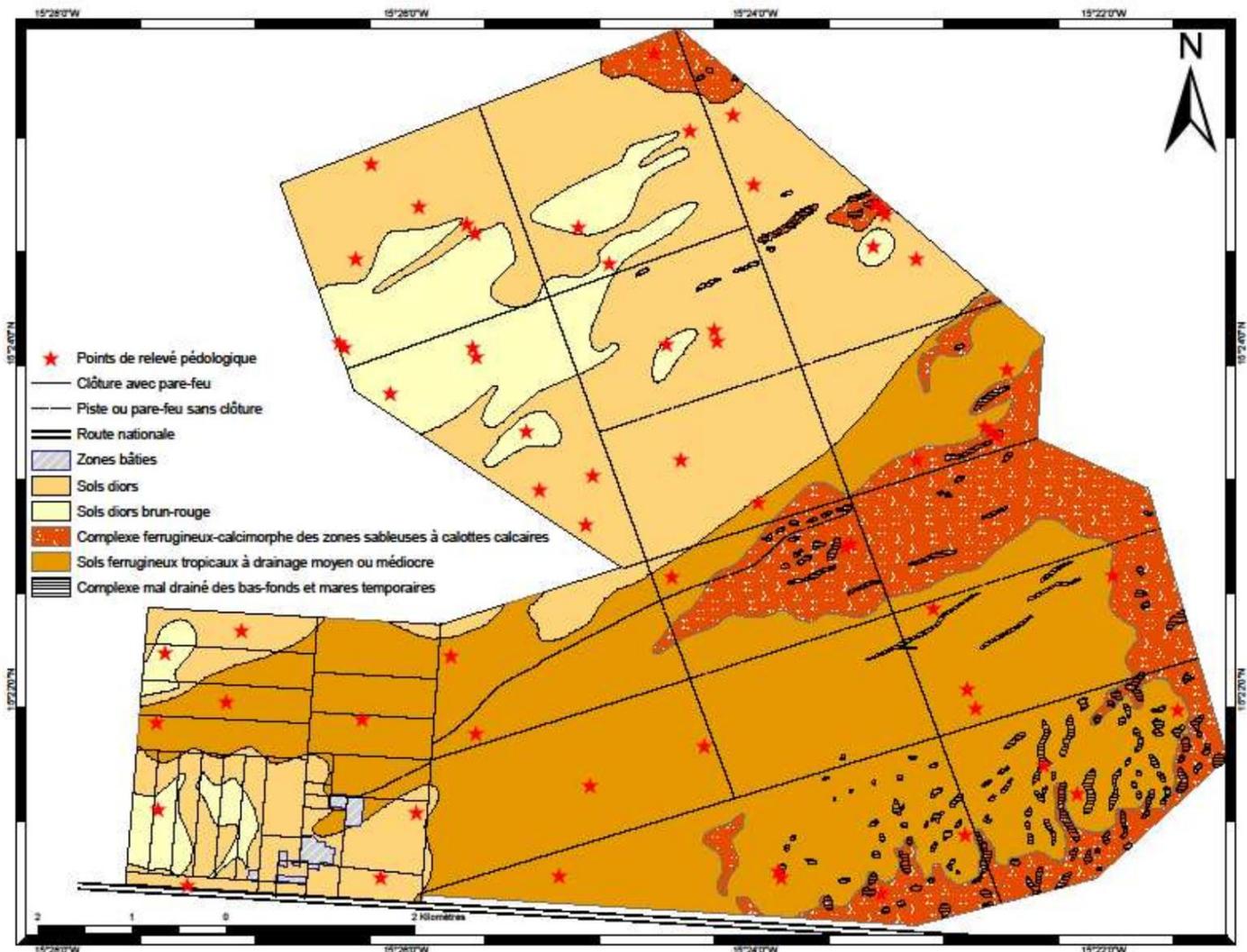


Figure 2: Les différentes unités pédologiques du CRZ (Ndiaye, 2015)

1.2. Impact des arbres sur la strate herbacée

Les écosystèmes sahéliens ont fait l'objet de plusieurs études au fil des années. Nombreux sont les travaux ayant été menés sur les interactions entre arbres et herbes (Grouzis *et al.*, 1991 ; Akpo *et al.*, 2003 ; Akpo et Grouzis, 2004). En effet, il a été mis en évidence en zone sahélienne que l'arbre exerce un effet positif sur la phytocénose herbacée.

Grouzis *et al.*, (1991) montrent que la présence des ligneux augmente de manière significative la richesse spécifique et la production fourragère de la strate herbacée. En effet l'impact des ligneux a été étudié dans diverses situations topographiques et a permis de relier la diversité des phytocénoses herbacées, l'organisation spatiale des espèces et l'augmentation de la phytomasse à la présence de l'arbre (Grouzis *et al.*, 1991).

La couronne de l'arbre offre un microclimat qui diminue l'évaporation de l'eau sous le couvert herbacé et du sol. Akpo *et al.* (2003) ont fait part d'une augmentation de la teneur en eau des fourrages herbacés jusqu'à 70% sous la couronne de l'arbre pendant la phase de croissance des herbes ; et une amélioration de la production du pâturage herbacé qui accroît de 2 à 5 fois plus sous la couronne de l'arbre.

A l'échelle du système d'exploitation, l'arbre accroît de 12 à 50% la production de la phytomasse herbacée épigée selon le système de parcours (Akpo *et al.*, 2003). Les ligneux améliorent la disponibilité en éléments nutritifs (matières organiques et éléments minéraux) et la qualité de l'herbage. Ils favorisent l'augmentation de la richesse spécifique en relation avec une importante contribution au tapis des graminées et des phorbes ce qui rend les fourrages d'excellente qualité (Akpo *et al.*, 2003). Le houppier de l'arbre crée un microclimat qui permet aux herbacées de boucler leur cycle et d'assurer la pérennité l'espèce (Diallo *et al.*, 2015).

En outre les services écologiques des ligneux ont été étudiés dans le contexte de la durabilité des systèmes d'exploitation des terres, leur adaptation et leur résilience aux effets des changements climatiques. L'intégration de l'arbre dans les systèmes d'exploitation agricoles s'est révélée être l'une des solutions pour accroître la productivité des cultures dans les zones arides et pauvres en nutriments (Paoletti *et al.*, 1992 ; Ong et Leakey, 1999 ; Rao et Mathuva, 2000 ; Hadgu *et al.*, 2009 ; Rroupsard *et al.*, 2020 ; Agbohessou, 2020). L'offre et la disponibilité d'éléments nutritifs dans le sol peuvent être positivement influencées par l'intégration du ligneux sur la parcelle. Le profond enracinement de l'arbre lui permet de récupérer les éléments nutritifs dans les parties du sol inaccessibles aux cultures et de les rendre disponibles à ces

dernières (Barrios et *al.*, 1996 ; Buresh et Tian, 1998). En bonifiant la qualité des sols, par la réduction du lessivage des nutriments et de l'érosion (Young, 1989 ; Ibrahim et Dave, 2014), les arbres peuvent accroître le rendement de certaines cultures agricoles (King, 1987).

1.3. Usages des drones en Afrique

La technologie des drones a fait l'objet de nombreuses études exploratoires en Afrique pour l'évaluation de leur potentialité afin de déterminer les secteurs dans lesquels les drones pourraient profiter au continent (UA et NEPAD, 2019). Les enjeux qui découlent de l'utilisation des drones sont d'ordre sécuritaire (pas de mise en danger du personnel par une limitation de l'exposition), économique (logistique de mise en œuvre simplifiée, acquisition des données plus rapide), technique (accessibilité à des zones non observables depuis le sol.) (Durand et *al.*, 2016). Toutefois pour s'accorder sur le potentiel d'utilisation des drones il est essentiel de voir en détail cette technologie, d'examiner ses composantes et quelques applications.

1.3.1 Types de drones

Sur le marché, les types de drones sont de plus en plus variés. Pour acquérir un drone il est important de se baser sur certains critères de choix (UA et NEPAD, 2019). Premièrement, il faut prendre en considération trois éléments déterminants et interdépendants : le poids de l'appareil, la capacité de charge et l'autonomie de vol. L'autonomie de vol renseigne sur la qualité et les capacités de la batterie. Cette dernière influence le poids de l'appareil. Les directives réglementaires sont établies compte tenu du poids total de l'appareil étant donné que le poids d'un drone est directement lié au risque opérationnel qu'il présente.

Tableau 1: Classification des drones par poids et par tailles (UA et NEPAD, 2019)

Classe	Masse brute maximale au décollage	Taille
Micro	<1 kg	Aucun composant du drone ne dépasse 50 cm
Mini	1-5 kg	Aucun composant du drone ne dépasse 200 cm
Petit	5-10 kg	Aucun composant du drone ne dépasse 500 cm
Moyen	10-25 kg	
Large	>25 kg	

Le deuxième critère important de choix d'un drone est le mode de commande qui peut se retrouver dans l'une des catégories suivantes :

- **Commande manuelle complète** : Le pilote exerce un contrôle total sur l'aéronef, sans assistance.
- **Commande manuelle assistée** : Le pilote contrôle l'aéronef, avec l'aide de capteurs montés sur l'engin, comme des accéléromètres, des détecteurs d'inclinaison ou des capteurs GPS.
- **Commande semi-automatique** : Le pilote est généralement chargé de planifier le vol, en configurant des paramètres comme les points de cheminement (ou waypoints – points ou lieux intermédiaires sur un itinéraire ou une trajectoire) et la vitesse lors du lancement du drone. Cependant, une fois que le drone a décollé, le pilote automatique prend le relais et le pilote ne doit intervenir qu'en cas d'urgence ou de modification du plan de vol.
- **Commande entièrement automatique** : Une fois que l'aéronef a décollé, le pilote n'a plus aucun contrôle dessus.

D'autre part, il existe un autre mode de classement des drones basé sur trois catégories à savoir : les multi-rotors (ou multicoptères), les aéronefs à voilure fixe et les ASP à décollage et atterrissage vertical (DAV). Les plus répandus sont les multi-rotors et les aéronefs à voilure fixe.

Dans la présente étude, nous avons utilisé un drone multi-rotors, plus précisément l'ANAFI de la marque Parrot (Figure3). Les multi-rotors sont actuellement les drones les plus populaires et se définissent comme des ASP qui utilisent au moins trois pales pour s'élever dans les airs et se déplacer. La mécanique de rotor simple utilisée dans ces ASP a sensiblement contribué à réduire la complexité du pilotage de tels engins. Grâce à leur commande de vol améliorée, les multi-rotors ont été utilisés à grande échelle dans des domaines tels que la photographie aérienne et l'inspection de sites. L'un de leurs principaux avantages réside dans leur capacité à décoller et atterrir verticalement, ce qui signifie qu'ils ont besoin de très peu d'espace pour se déployer.

L'ANAFI est doté d'un capteur multi-spectres Rouge Vert Bleu stabilisé sur 5 axes (2 axes mécaniques et 3 axes électroniques) permettant ainsi de prendre des images claires, malgré les vibrations liées aux vols de drones. Le zoom x3 et l'inclinaison à 180° de la caméra permettent d'obtenir une vue détaillée de la cible observée. Pliable (dimensions pliées :

224x67x65 mm, dimensions dépliées : 175x240x65 mm), léger (poids : 320g) et facilement déployable, ANAFI peut être mis en place en quelques secondes seulement. L'autonomie de la batterie est de 25 minutes et est gérée en permanence par l'ordinateur de bord afin d'assurer la sécurité de la mission. ANAFI est programmé pour revenir automatiquement à son point de départ lorsque le niveau de la batterie devient critique (mode Return To Home).



Figure 3: Drone Anafi de la marque Parrot

1.3.3.Applications civiles de la technologie des drones

L'avènement des ASP a révolutionné les méthodes d'arpentage des terres (UA et NEPAD, 2019). Les ASP permettent de collecter, avec précision, des assortiments de données plus complets à des résolutions supérieures à celle des satellites et des caméras traditionnelles, pour faciliter à la prise de décision. À partir de ces données, des cartes peuvent être réalisées dans le cadre de l'aménagement du territoire, dans la mise en place, le suivi et la gestion du cadastre, la gestion des risques d'inondation, etc.

L'évaluation des régimes fonciers et l'instauration des titres fonciers sont également facilitées par les services des ASP qui accélèrent les processus d'enregistrement des terrains. L'accès à la terre constitue un détail crucial dans le monde rural africain car il permet à des millions de personnes de pouvoir manger à leur faim. Bien que les personnes concernées exercent d'autres activités, la culture de la terre permet, à celles-ci, de subvenir à certains besoins élémentaires pendant les périodes d'instabilité économique et contribue à la définition des cultures et des identités. Mais étant donné que seulement 10% des terres en zone rurale sont cartographiées, cela constitue un obstacle pour solutionner certains problèmes de base que rencontre une grande partie de la population africaine. Les ASP, dans ce contexte ci, peuvent fournir rapidement et avec précision des données et des modèles numériques de haute résolution

pouvant servir à l'aménagement du territoire, la vérification, la correction ou le réaligement des limites cadastrales, le développement ou la modernisation des infrastructures et d'autres usages. (UA et NEPAD, 2019).

La technologie des drones est également utilisée dans le secteur tertiaire en particulier lorsque l'acheminement de petits colis par voie routière devient difficile. Les ASP servent d'alternative au système de transport traditionnel en assurant avec rapidité une livraison aérienne (UA et NEPAD, 2019). Les coûts économiques de cette utilisation des drones en Afrique sont toujours en évaluation.

Les drones sont aussi utilisés dans la gestion des actifs agricoles (UA et NEPAD, 2019). Ils offrent une vue d'ensemble sur les cultures permettant ainsi aux agriculteurs de détecter aisément les changements infimes difficilement repérables par des observateurs au sol. Munis de capteurs spécialisés, les drones peuvent fournir des données, sur les cultures, comme l'indice de végétation par différence normalisée (NDVI), l'indice de surface foliaire (LAI) ou encore l'indice de réflectance photochimique (PRI) qui mesure l'efficacité d'utilisation de la lumière photosynthétique, ce qui permet aux utilisateurs de visualiser des changements dans les cultures ou des conditions de stress invisibles à l'œil nu.

Le NDVI permet d'étudier les différents niveaux de biomasse sur le système d'exploitation agricole. L'interprétation des images NDVI fournit des renseignements détaillés sur le stress hydrique, les carences en nutriments, les infestations parasitaires, les maladies des cultures et d'autres problèmes qui affectent le développement des cultures (Meneses-Tovar, 2011; Gavelle, 2015 ; UA et NEPAD, 2019).

Le processus d'inventaire des cultures et d'estimation de rendements peut être aussi accéléré par la collecte de données par drone (Roupsard et *al.*, 2020 ; Agbohessou, 2020 ; UA et NEPAD, 2019). Aussi, les drones permettent de déterminer la position des troupeaux et de contrôler l'état des clôtures des parcours (Greenwood, 2016). Les ASP permettent aussi d'avoir une visibilité sur le troupeau, d'identifier les individus et les utilisations pour prendre les mensurations morphologiques sur les animaux sont actuellement à l'essai au Centre de Recherches Zootechniques de Dahra, au Sénégal (Fassinou et *al.*, soumis).

Dans le domaine de la recherche scientifique, la littérature mentionne plusieurs utilisations des ASP. Par exemple pour mener des recherches archéologiques, mesurer un niveau de contamination, analyser les nuages de cendres produits par des éruptions volcaniques,

étudier des régions côtières, surveiller les glaciers, identifier des espèces végétales ou classifier des phénotypes, dresser un inventaire de végétaux ou de gibiers, etc, les ASP ont couramment été utilisés (UA et NEPAD, 2019).

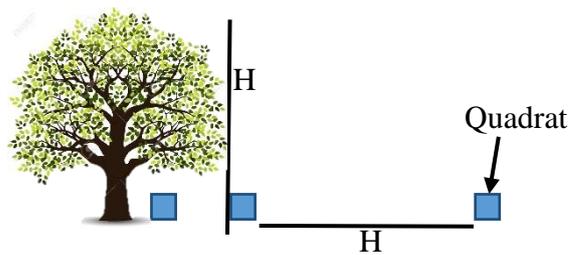
Bossoukpe (2021) a montré l'utilité du drone pour la mesure des caractéristiques des arbres dans la savane sahélienne par la méthode de la photogrammétrie Rouge Vert Bleu (RVB) ou S-f-M (Structure from Motion). Les modèles numériques (modèle de hauteur de la couronne (CHM) et orthophoto) de haute résolution, produits à partir des données du drone, ont permis d'estimer la hauteur des arbres et la surface terrière et d'identifier les espèces d'arbres présentes. Plusieurs autres études ont démontré les mérites des drones pour évaluer la phytomasse des ligneux et des herbacées dans les écosystèmes sahéliens par la collecte d'images géospatiales et la photogrammétrie (Taugourdeau et *al.*, 2019 ; Bossoukpe, 2020 ; Taugourdeau et *al.*, 2022).

2. Matériel et méthodes

2.1. Relevés sur la végétation herbacée

Sept arbres ont été choisis par la méthode d'échantillonnage aléatoire simple sur la parcelle. Trois quadrats, de 1m² chacun, répartis sous la couronne, à la limite de la couronne et à une distance équivalente à la hauteur de l'arbre (Figure 4) ont fait objet de relevés phytosociologiques tous les deux jours sur une période allant du 19 juillet 2020 au 17 septembre 2020. Ces trois quadrats ont été relevés sur un pied d'arbre, tous les deux jours, de façon rotatoire sur les sept arbres jusqu'à parcourir les quatre azimuts (angle dans le plan horizontal entre la direction d'un objet et une direction de référence) au niveau de chaque pied (Figure 5). L'unité pédologique sur laquelle se retrouve la parcelle est celle des sols diors. Les paramètres de la strate herbacée collectés au sein des quadrats sont :

- le taux de recouvrement des herbacées au sein du quadrat ;
- le pourcentage des stades phénologiques de la strate herbacée : le pourcentage de feuillaison, le pourcentage de floraison et fructification, et le pourcentage de sénescence ;
- le taux de recouvrement des différentes espèces présentes dans le quadrat ;
- la hauteur de 10 individus de herbacés présents dans le quadrat ;
- la phytomasse fraîche au-dessus du sol ;
- la phytomasse sèche, après séchage à 65°C à l'étuve, jusqu'à poids constant.



H=hauteur de l'arbre

Figure 4: Positionnement des quadrats

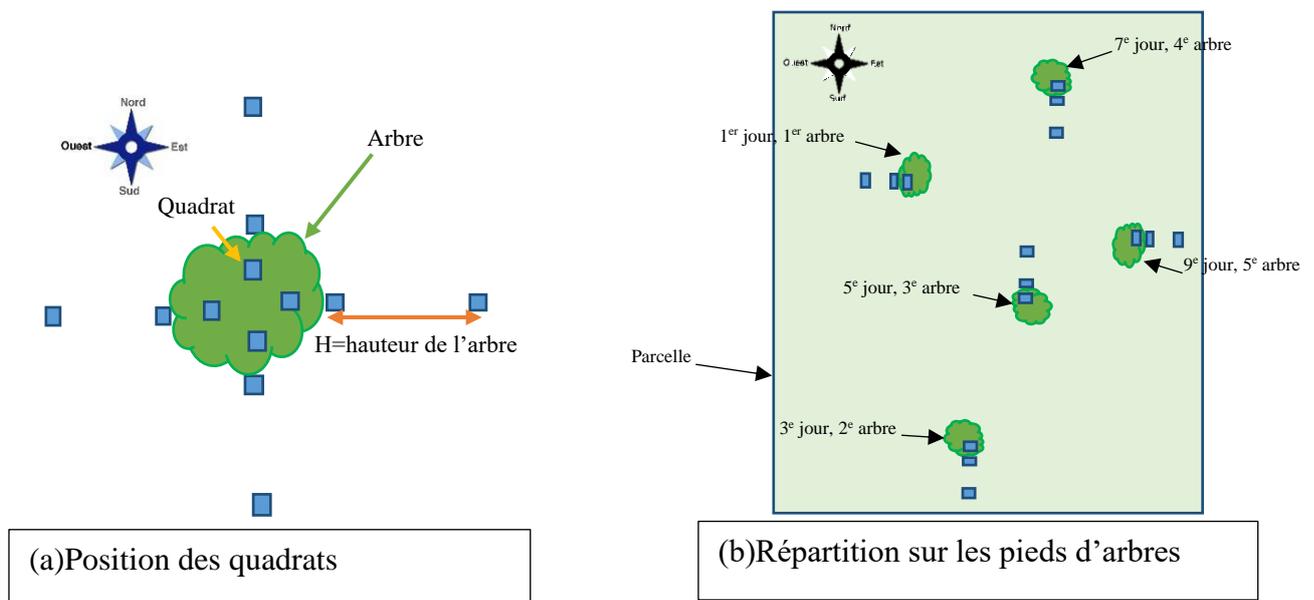


Figure 5: Dispositif expérimental

Ces diverses données ont été enregistrées sur Kobocollect au moment de leur collecte sur le terrain. Elles ont été déchargées après dans le tableur Excel pour traitement et analyse.

2.2.Acquisition d'images géospatiales par drone

Le drone utilisé dans cette étude est l'ANAFI de la marque Parrot. Le capteur est une caméra visible capable de photographier à 21 Mégapixels. Chaque journée de collecte de données, avant la coupe de biomasse, un vol de drone est réalisé pour l'acquisition d'images géoréférencées. Il a été effectué au total soixante-un (61) vols de drone en 61 jours de collecte sur la période allant du 19 juillet 2020 au 17 septembre 2020. Les missions du drone pour l'acquisition d'images géospatiales ont été effectuées à l'aide de l'application PIX4D Capture (Figure 6). Les vols sont faits à 60 m d'altitude, à une vitesse de 2 m.s⁻¹, avec un taux de

recouvrement entre les images de 90%, sur une double grille de 100 m x 100 m et l'angle d'inclinaison de la caméra fixé à 80°. Le drone une fois connecté à l'application exécute directement le plan de vol.



Figure 6 : Interface de l'application PIX4D Capture montrant les paramètres du vol de drone

Les paramètres de vol ont été définis sur la base des travaux de Taugourdeau *et al.* (2019) et de Bossoukpe (2020) sur l'estimation des caractéristiques des arbres et de la phytomasse herbacée par drone. Ces investigations nous ont permis de choisir l'altitude de vol adéquate pour la présente étude.

2.3. Traitement des données

Les images prises par drone, pour chaque journée de collecte, ont été analysées dans le logiciel PIX4DMapper par la méthode d'analyse en trois dimensions : Structure from Motion ou Photogrammétrie (Figure 7).

L'analyse d'images sur PIX4D se fait en trois étapes : l'initialisation, la densification, et la création de modèles numériques. L'initialisation (Figure 8A) correspond à la phase de recherche des points communs entre les images se recouvrant grâce à des algorithmes de correspondance automatique basés sur les caractéristiques des objets qui figurent sur les images. Un ajustement de faisceaux en bloc est ensuite effectué pour calculer les positions et les orientations de chaque caméra. L'orientation absolue ou géoréférencement (grâce au positionnement GPS des images) peut être réalisée à la suite de cette étape ou intégrée dans le calcul d'ajustement en bloc. Ensuite, grâce à un algorithme d'appariement dense, le logiciel recherche la correspondance entre pixels et génère ainsi le nuage de points densifié : c'est l'étape de densification (Figure 8B). Puis, à partir de ce nuage de points densifié, il produit le modèle 3D (Figure 8C et Figure 8D) texturé où chaque point a une position x, y, et z connue.

Enfin, en projetant les images drones sur ce nuage de points, le logiciel crée des images orthorectifiées et géoréférencées : ce sont les orthophotographies. Ces orthophotographies contiennent différentes informations par pixel : données Rouge Vert Bleu (RVB), hauteur de surface à partir du modèle numérique de surface (DSM).

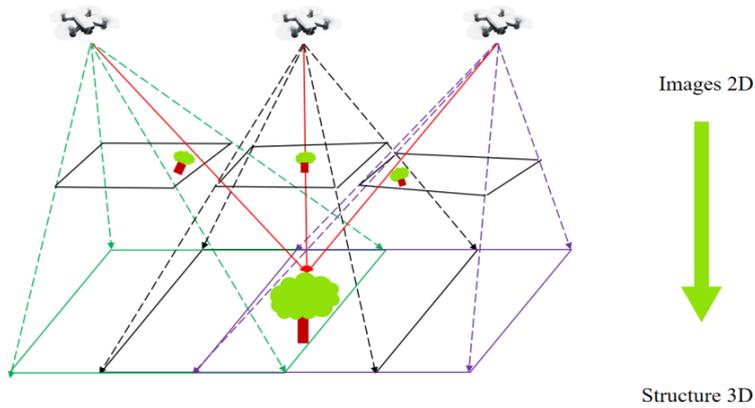
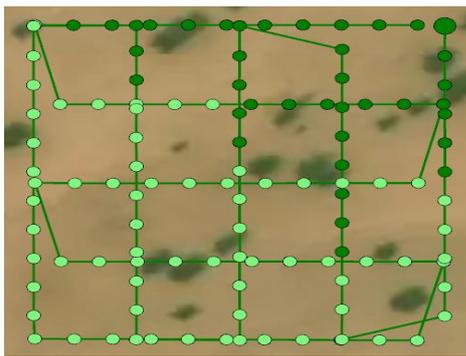
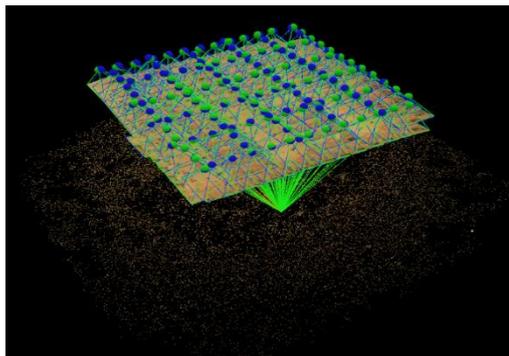


Figure 7 : Principe de fonctionnement de la photogrammétrie (Bossoukpe, 2020)



A : Traitement d'initialisation



B : Densification de points



C : Orthomosaïc



D : Modèle numérique de surface (DSM)

Figure 8: Analyse d'images sur PIX4D Mapper

A la suite de l'analyse PIX4D, les modèles numériques obtenus ont été traités avec le logiciel QGIS. Un shapefile contenant l'ensemble des quadrats relevés a été créé. A l'aide de l'outil de traitement « Statistique de Zone » de QGIS, les valeurs moyennes des spectres Rouge, Vert et Bleu et du DSM ont été produites, ainsi que les valeurs maximum et minimum du DSM. Ensuite avec l'outil calculatrice Raster, des transformations multispectrales ont été effectuées pour produire des grandeurs ayant une certaine signification dans l'étude de la végétation. Ces grandeurs sont les indices colorés VARI, EXG, GLI, NDGRI, NDBRI et NDBGI présentés dans le Tableau 2. Cette série de manipulations a été effectuée sur la carte 3D de chaque journée de collecte. Ensuite la table d'attributs a été extraite sous format « CSV ». L'ensemble des variables obtenues à partir des cartes 3D sont consignées dans le Tableau 3.

Le modèle de surface numérique (DSM) représente les élévations des surfaces réfléchissantes des herbes, des arbres, et d'autres caractéristiques élevées au-dessus de la terre nue. Le Hmean est la hauteur moyenne du couvert herbacé à l'intérieur du quadrat, le Hmax équivaut à la hauteur dominante du couvert herbacé au sein du quadrat et le Hmin est l'élévation du sol par rapport au niveau de la mer.

Tableau 2 : Indices de végétation

Acronyme	Nom	Formules
VARI	Visible Atmospheric Resistant Index	$(\text{Vert-Rouge}) / (\text{Vert} + \text{Rouge} - \text{Bleu})$
EXG	Excess of green	$\text{Vert} - 0.39 * \text{Rouge} - 0.61 * \text{Bleu}$
GLI	Green Leaf Index	$(2 * \text{Vert} - \text{Rouge} - \text{Bleu}) / (2 * \text{Vert} + \text{Rouge} + \text{Bleu})$
NDGRI	Normalized Difference Green Red Index	$(\text{Rouge} - \text{Vert}) / (\text{Rouge} + \text{Vert})$
NDBRI	Normalized Difference Blue Red Index	$(\text{Rouge} - \text{Bleu}) / (\text{Rouge} + \text{Bleu})$
NDBGI	Normalized Difference Blue Green Index	$(\text{Vert} - \text{Bleu}) / (\text{Vert} + \text{Bleu})$

Tableau 3 : Variables extraites des cartes 3D

Variables	Cartes d'obtention
Rouge, Vert, Bleu, VARI, EXG, GLI, NDGRI, NDBRI, NDBGI	Orthomosaïc

Hmean, Hmin, Hmax	DSM (Modèle Numérique de Surface)
-------------------	-----------------------------------

2.3.1. Calibration entre les données du drone et les paramètres de la strate herbacée mesurés sur le terrain

Les paramètres du couvert herbacé étudiés sont le taux de recouvrement de la végétation, le pourcentage de feuillaison, de floraison, de sénescence, la phytomasse fraîche et la phytomasse sèche. Pour cela, il s'est agi précisément d'établir, dans le logiciel R, un modèle de régression appelé Stepwise Regression sur les variables obtenues par cartographie 3D, pour chaque paramètre de la végétation (obtenu par mesure directe sur le terrain). La régression Stepwise est une procédure automatique de calcul de prédiction. La procédure considère étape par étape une variable extraite des cartes 3D l'additionnant ou la soustrayant de l'ensemble des variables explicatives du paramètre (de la végétation) considéré. En fonction des critères prédéterminés comme le AIC (Akaike Information Criterion) et le R^2 (Erreur quadratique) ajusté, elle détermine les variables qui expliquent le mieux les paramètres de la végétation. La régression Stepwise a servi aux calibrations par l'établissement des régressions entre les données du drone et celles des mesures directes et la production des cartes de biomasse.

2.3.2. Etude de la dynamique de la biomasse du couvert herbacé par SfM

L'équation de prédiction obtenue pour le paramètre de la phytomasse sèche, dans la réalisation de la phase précédente, a été exécutée dans QGIS sur les orthomosaïcs, à l'aide de la calculatrice raster. Cela a permis de produire la carte de phytomasse sèche. L'opération a été effectuée sur l'orthomosaïc de chaque journée de collecte et la table des attributs a été extraite en format « CSV ». Les phytomasses pour chaque journée de collecte étant obtenues, les courbes de dynamique ont été établies dans le logiciel R.

En outre, des tests statistiques ont été effectués pour constater ou juger l'existence ou non de différences significatives entre la phytomasse sèche sous couronne, la phytomasse à la limite de la couronne et la phytomasse à distance des arbres. Les tests ont été réalisés sur les valeurs extraites des cartes de biomasse obtenues après calibration et confirmées sur les données de mesures directes. Notons que la diversité spécifique ligneuse n'a pas été considérée dans les tests. L'objectif étant d'apprécier la capacité du drone muni du capteur RVB à montrer l'effet de la distance de l'arbre sur la végétation herbacée quelle que soit l'espèce.

2.3.3. Etude de la distance d'influence des arbres sur la variation du couvert herbacé

Il s'est agi ici d'étudier l'effet de la distance de l'arbre sur la production fourragère herbacée. L'établissement d'un variogramme a permis d'étudier la variabilité spatiale de la phytomasse par rapport à l'arbre sur la parcelle. En effet l'effet de la distance à l'arbre correspond au paramètre « Range » qui a été analysé par géostatistique dans R, en utilisant les bibliothèques gstat (Pebesma, 2004) et sp (Bivand et al., 2008).

Une grille, de 1 m² de cellules, a été délimitée sur les cartes de phytomasse sèche dans le logiciel QGIS. Puis, les centroïdes des cellules ont été étudiés par rapport à la distance à la couronne de l'arbre proximal en suivant quatre azimuts (Nord, Sud, Est, Ouest). L'idée derrière le variogramme est que deux observations situées l'une près de l'autre devraient, en moyenne, se ressembler davantage que deux observations éloignées. La bibliothèque automap et la fonction autofitVariogram ont été utilisées pour sélectionner le meilleur modèle.

3. Résultats

3.1. Calibration entre les données du drone et les paramètres de la strate herbacée mesurés sur le terrain

Les données ont été collectées sur une parcelle de 1 hectare durant la saison des pluies 2020, plus précisément du 19 juillet au 17 septembre 2020. Les espèces d'arbres présentes sur la parcelle sont le *Vachellia tortilis* et le *Balanites aegyptiaca*. Les paramètres mesurés sur les arbres de la parcelle sont présentés dans le tableau suivant.

Tableau 4: Paramètres dendrométriques des arbres du site

Nom scientifique	Hauteur en mètre	Diamètre du houppier (Nord-Sud) en mètre	Diamètre du houppier (Est-Ouest) en mètre	DmH en mètre
<i>Vachellia tortilis</i>	8,84	15,4	14,4	14,9
<i>Balanites aegyptiaca</i>	2,66	2	2	2
<i>Balanites aegyptiaca</i>	8,38	6,55	6	6,275
<i>Balanites aegyptiaca</i>	3,81	2,5	1,8	2,15
<i>Balanites aegyptiaca</i>	6,16	5,1	4,7	4,9
<i>Vachellia tortilis</i>	5,10	5,4	5,12	5,26
<i>Vachellia tortilis</i>	5,66	6	5	5,5
<i>Vachellia tortilis</i>	8,39	12	12,7	12,35

<i>Balanites aegyptiaca</i>	6,72	4,76	4,8	4,78
<i>Vachellia tortilis</i>	2,32	1,95	2,2	2,075
<i>Balanites aegyptiaca</i>	8,01	6	6,8	6,4
<i>Vachellia tortilis</i>	3,28	1,55	1,8	1,675
<i>Vachellia tortilis</i>	8,61	12	10	11
<i>Vachellia tortilis</i>	6,39	9,8	8,3	9,05
<i>Vachellia tortilis</i>	5,73	5,73	6,25	5,99

Les arbres ont des hauteurs comprises entre 2,3 et 8,8 mètres et une couverture aérienne de 6,4%.

La calibration a été effectuée sur les paramètres suivants de la végétation herbacée : la phytomasse fraîche, la phytomasse sèche, le taux de recouvrement de la végétation, le taux de feuillaison, le taux de floraison et le taux de senescence.

3.1.1. Phytomasse fraîche

Les résultats de la régression Stepwise entre la phytomasse fraîche et les variables du drone ANAFI (Tableau 5) montrent que les variables explicatives de ce paramètre sont les réflectances Rouge, Vert, Bleu, l'indice NDBRI, Hmean et Hmax. Les réflectances Rouge, Vert et l'indice NDBRI, de p-value respectifs $1,04e^{-09}$; $2,01e^{-06}$ et 0,02, constituent des ajouts significatifs dans l'équation de prédiction, tandis que la réflectance Bleu, le Hmean et le Hmax, de p-value respectifs 0,06 ; 0,1 et 0,15 n'ont pas une contribution significative dans le modèle de prédiction.

Tableau 5 : Régression stepwise sur la phytomasse fraîche

	Estimate	Std. Error	t value	Pr(> t)
(Intercept)	-1,156522	0,693962	-1,667	0,1013
rouge	-0,024763	0,003373	-7,342	1,04e-09
vert	0,020062	0,003776	5,314	2,01e-06
bleu	0,014478	0,007669	1,888	0,0643
NDBRI	3,509109	1,469488	2,388	0,0204
Hmean	0,288276	0,174699	1,650	0,1046
Hmax	-0,100091	0,069991	-1,430	0,1584

La figure 9 présente le graphique du modèle. Le modèle est significatif avec un p-value= $9,21e^{-13}$; un $R^2 = 0,67$ et la droite d'ajustement est une pente à forte montée.

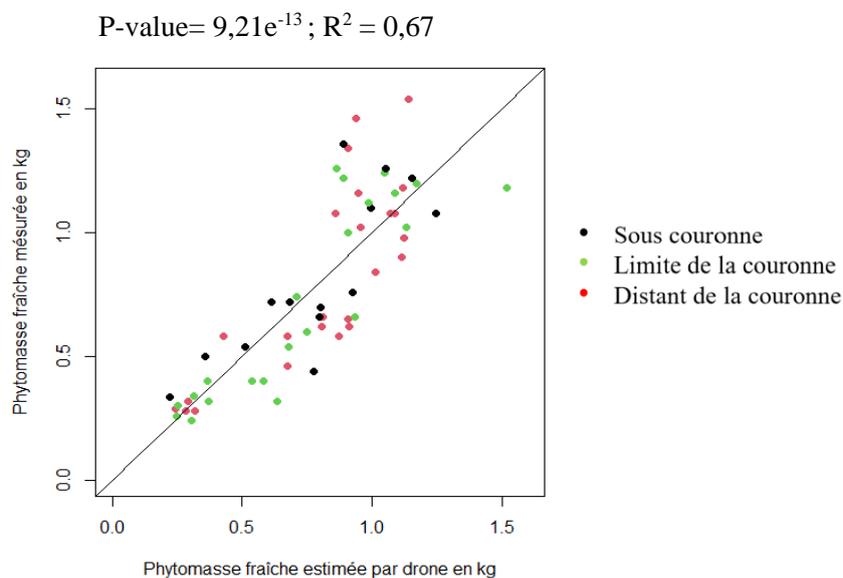


Figure 9:Graphique de la régression stepwise sur la phytomasse fraîche du 19 juillet au 17 septembre 2020 dans un écosystème sahélien.

3.1.2. Phytomasse sèche

Les variables explicatives de la phytomasse sèche sont les réflectances Rouge, Vert, Bleu et l'indice NDBRI (Tableau6). Exceptée la réflectance Bleu (p-value=0,07), les variables Rouge (p-value= $3,1e^{-09}$), Vert (p-value= $8,9e^{-07}$) et NDBRI (p-value=0,02) constituent des ajouts significatifs de l'équation de prédiction.

Tableau 6 : Régression stepwise sur la phytomasse sèche

	Estimate	Std. Error	t value	Pr(> t)
(Intercept)	-0,2909917	0,1608362	-1,809	0,0757
rouge	-0,0054282	0,0007750	-7,004	3,13e-09
vert	0,0047544	0,0008624	5,513	8,90e-07
bleu	0,0032052	0,0017817	1,799	0,0773
NDBRI	0,7801059	0,3409227	2,288	0,0259

La figure 10 présente le graphique du modèle de prédiction. Le modèle est significatif de $p\text{-value} = 3.95e^{-13}$, de $R^2 = 0.65$ et la droite d'ajustement est une pente à forte montée.

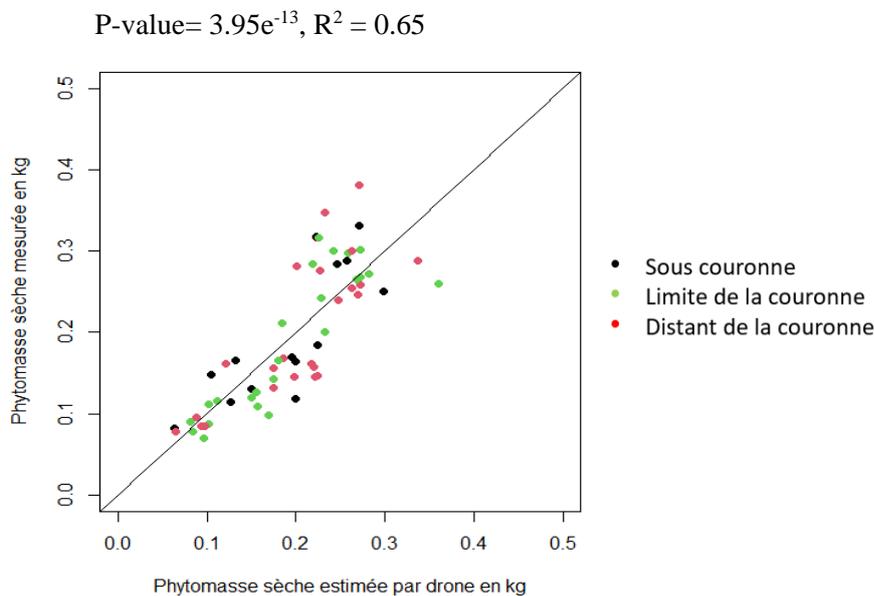


Figure 10: Graphique de la régression stepwise sur la phytomasse sèche du 19 juillet au 17 septembre 2020 dans un écosystème sahélien

3.1.3. Taux de recouvrement

Les variables prédictives de ce paramètre sont la réflectance Rouge, les indices Gli, NDGRI, NDBGI et le Hmean. Parmi ces variables, la réflectance Rouge ($p\text{-value} = 0.0004$), le NDBGI ($p\text{-value} = 0.04$) et le Hmean ($p\text{-value} = 0.0001$) constituent des ajouts significatifs dans le modèle de prédiction, tandis que les indices Gli ($p\text{-value} = 0.052$) et NDGRI ($p\text{-value} = 0.12$) n'ont pas une contribution significative (Tableau 7).

Tableau 7 : Régression stepwise sur le recouvrement de la strate herbacée

	Estimate	Std. Error	t value	Pr(> t)
(Intercept)	1.002784	0.174371	5.751	3.85e-07
rouge	-0.004052	0.001088	-3.724	0.000457
gli	-5.904506	2.982706	-1.980	0.052674
NDGRI	-3.308738	2.100244	-1.575	0.120796
NDBGI	2.359352	1.130370	2.087	0.041430
Hmean	0.159529	0.039810	4.007	0.000183

La figure 11 présente le graphique du modèle de prédiction. Le modèle est significatif avec un $p\text{-value}=9,652e^{-06}$; un $R^2 = 0,36$ qui traduit une corrélation faible avec une droite d'ajustement qui est une pente positive.

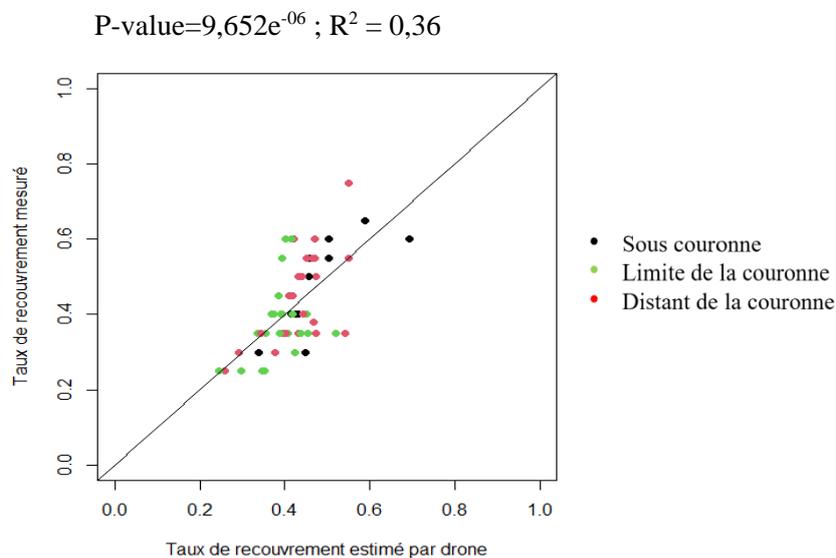


Figure 11:Graphique de la régression stepwise sur le recouvrement de la végétation herbacée du 19 juillet au 17 septembre 2020 dans un écosystème sahélien.

3.1.4.Taux de feuillaison

Les réflectances Rouge, Vert, les indices Gli, NDGRI et le Hmean sont les variables explicatives de ce paramètre, d'après la régression Stepwise entre les données (Tableau8). L'ensemble de ces variables constitue des ajouts significatifs dans le modèle de prédiction. Le modèle est significatif avec un $p\text{-value} = 3,297e-06$; un $R^2 = 0,39$ (corrélation faible) et la droite d'ajustement est une pente positive (Figure 12).

Tableau 8 : Régression stepwise sur le taux de feuillaison

	Estimate	Std. Error	t value	Pr(> t)
(Intercept)	88,8093	16,9600	5,236	2,55e-06
rouge	2,3556	0,7002	3,364	0,001390
vert	-2,2844	0,6646	-3,437	0,001114
gli	-69,7931	18,2629	-3,822	0,000335
NDGRI	-709,2696	218,0512	-3,253	0,001939
Hmean	-10,7308	3,8946	-2,755	0,007896

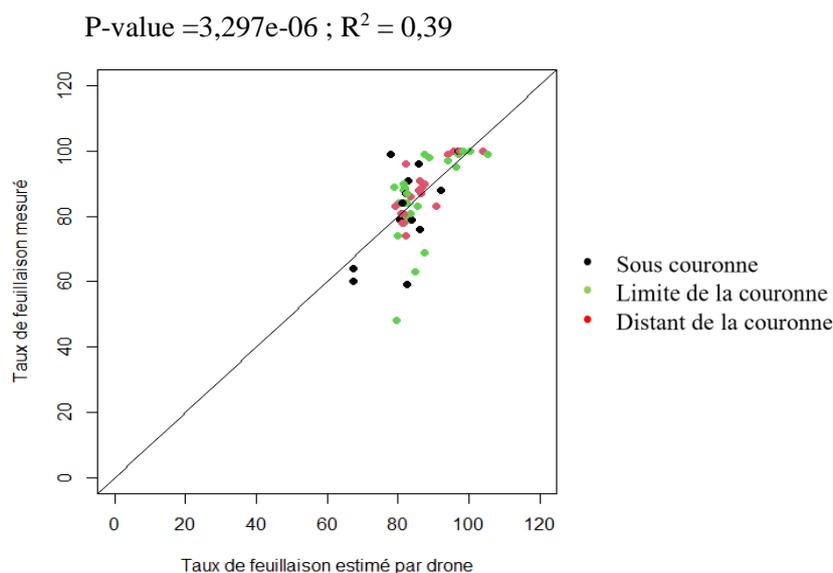


Figure 12 : Graphique de la régression stepwise sur le taux de feuillaison du 19 juillet au 17 septembre 2020 dans un écosystème sahélien

3.1.5. Taux de floraison

Les réflectances Rouge, Vert, les indices Gli, NDGRI et le Hmean sont les variables explicatives de ce paramètre, d'après la régression Stepwise entre les données (Tableau9). L'ensemble de ces variables constitue des ajouts significatifs dans le modèle de prédiction. Le modèle est significatif avec un p-value = 7,632e⁻⁰⁶ ; un R² = 0,37 et la droite d'ajustement est une pente positive (Figure13).

Tableau 9 : Régression stepwise sur le taux de floraison

	Estimate	Std. Error	t value	Pr(> t)
(Intercept)	9,9323	16,2287	0,612	0,54300
rouge	-2,1046	0,6700	-3,141	0,00269
vert	2,0415	0,6359	3,210	0,00220
Gli	60,4441	17,4754	3,459	0,00104
NDGRI	634,9390	208,6486	3,043	0,00356
Hmean	11,8099	3,7266	3,169	0,00248

P-value = $7,632e^{-06}$; $R^2 = 0,37$

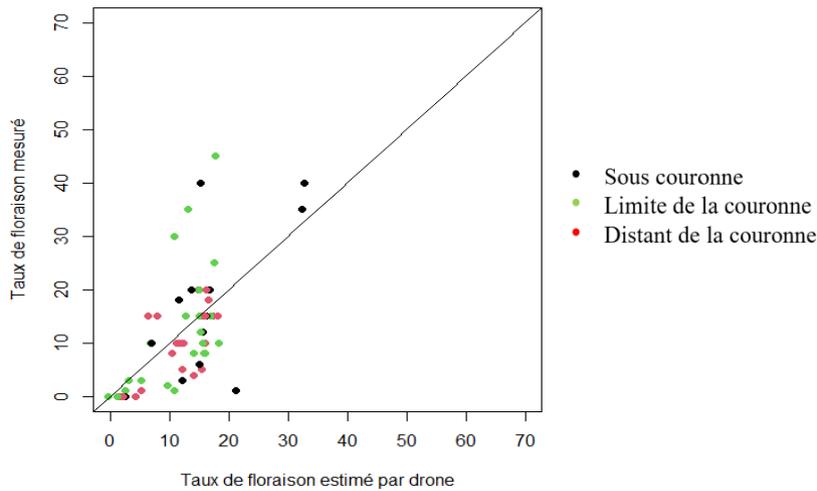


Figure 13 : Graphique de la régression stepwise sur le taux de floraison du 19 juillet au 17 septembre 2020 dans un écosystème sahélien

3.1.6. Taux de senescence

Les résultats de la régression (Tableau10) montrent que les variables explicatives de ce paramètre sont les réflectances Rouge, Bleu et l'indice NDBRI. Et parmi elles, seule la réflectance Rouge (p-value = 0,02) constitue un ajout significatif au modèle de prédiction. La prédiction est significative avec un p-value = 0,007 ; un $R^2 = 0,14$ (corrélation très faible) et la droite d'ajustement est une pente positive (Figure14).

Tableau 10 : Régression stepwise sur le taux de senescence

	Estimate	Std. Error	t value	Pr(> t)
(Intercept)	-5,21234	5,09058	-1,024	0,3101
rouge	-0,05523	0,02424	-2,278	0,0264
bleu	0,08961	0,05545	1,616	0,1116
NDBRI	20,25346	10,55410	1,919	0,0599

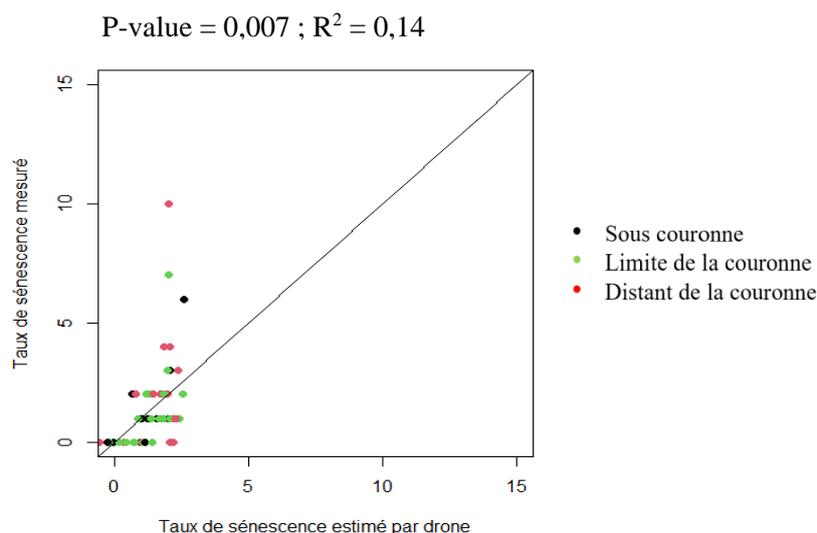


Figure 14 : Graphique de la régression stepwise sur le taux de sénescence du 19 juillet au 17 septembre 2020 dans un écosystème sahélien

L'ensemble des résultats sur la calibration entre drone et paramètres de végétation collectés sur le terrain sont présentés dans le tableau ci-après :

Tableau 11 : Tableau récapitulatif de la calibration sur la variation des paramètres de la strate herbacée

Paramètres de la strate herbacée	R ²	Variables explicatives	p-value
Phytomasse fraîche	0,67	Rouge, Vert, Bleu, NDBRI, Hmean, Hmax	9,21e ⁻¹³
Phytomasse sèche	0,65	Rouge, Vert, Bleu, NDBRI	3,95e ⁻¹³
Recouvrement de la végétation	0,36	Rouge, Gli, NDGRI, NDBGI, Hmean	9,652e ⁻⁰⁶
Taux de feuillaison	0,39	Rouge, Vert, Gli, NDGRI, Hmean	3,297e ⁻⁰⁶
Taux de floraison	0,37	Rouge, Vert, Gli, NDGRI, Hmean	7,632e ⁻⁰⁶
Taux de sénescence	0,14	Rouge, Bleu, NDBRI	0,007

3.2. Etude de la dynamique de la biomasse du couvert herbacé par SfM

L'équation de prédiction ci-après est déduite du Tableau 6 :

$$F(p) = -0,0054282 \cdot \text{rouge} + 0,0047544 \cdot \text{vert} + 0,0032052 \cdot \text{bleu} + 0,7801059 \cdot \text{NDBRI} - 0,2909917$$

Avec F(p) la fonction de prédiction de la phytomasse sèche.

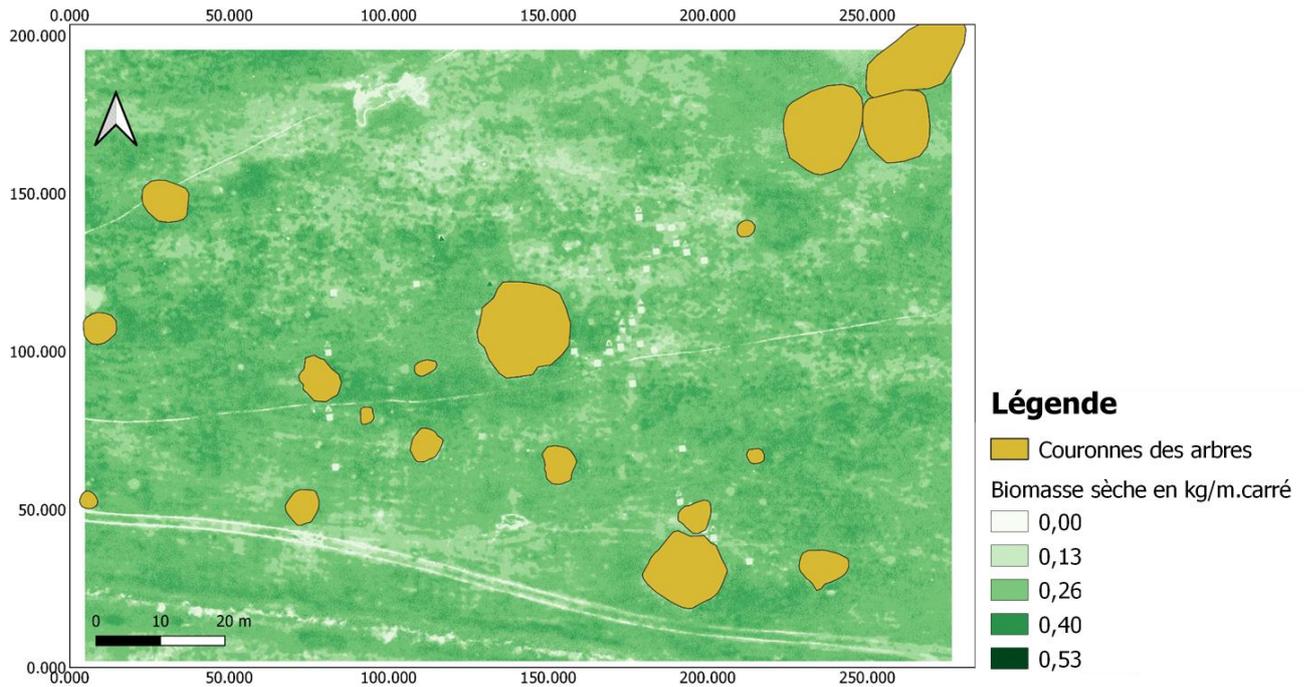


Figure 15 : Carte de phytomasse sèche du 5/09/2020 de la parcelle d'expérimentation au CRZ de Dahra

Après la calibration, il a été obtenu des pixels négatifs qui n'ont malheureusement pas pu être corrigés dans la suite du travail. Aussi, notons qu'il n'a pas été possible d'observer certains quadrats se situant sous le houppier des grands arbres de *Vachellia tortilis* et de *Balanites aegyptiaca* de la parcelle. Les différents types de quadrats ont été codifiés, soit SC pour les quadrats sous la couronne des arbres quand ils étaient visibles, BC pour les quadrats à la limite de la couronne des arbres et DC pour les quadrats situés à une distance égale à la hauteur de l'arbre.

Les figures 16, 17 et 18 présentent la dynamique de la phytomasse au sein des unités d'échantillonnage, et les changements liés à la fauche. Elles présentent, plus précisément, l'évolution de la phytomasse au sein des quadrats qui ont été fauchés à différentes dates de la saison. D'après l'allure des trois courbes, l'impact de la fauche est remarquable et s'apprécie par la valeur de la phytomasse qui s'annule.

Sur la Figure 16, les trois quadrats ont été fauchés le 31/07/2020. L'impact de la fauche se remarque donc à la date du 06/08/2020 surtout au sein des quadrats à la limite et distant de la couronne. Mais la végétation sous arbre a rapidement poussé en l'intervalle de quatre (04) jours ce qui fait qu'à la date du 06/08/2020 la valeur de la phytomasse est déjà supérieure à 0. Dans les quadrats à la limite et distant de la couronne, la végétation n'a repris correctement

qu'après 18 jours et on observe ensuite une évolution croissante des valeurs de la phytomasse. Sur la Figure 17, les trois courbes de la phytomasse suivent une tendance croissante jusqu'au 30/08/2020 où la végétation au sein de ces trois quadrats a été fauchée. On remarque l'effet de la fauche au jour de collecte suivant ie le 01/09/2020, qui s'apprécie aussi par la valeur de la phytomasse qui est égale à 0. Puis la végétation a repoussé après 14 jours. Sur la Figure 18, l'allure des trois courbes est croissante jusqu'à la date du 09/09/2020 où la végétation a été fauchée. On remarque aussi l'effet de la fauche au jour de collecte suivant ie le 11/09/2020, qui s'apprécie aussi par la valeur de la phytomasse qui est égale à 0.

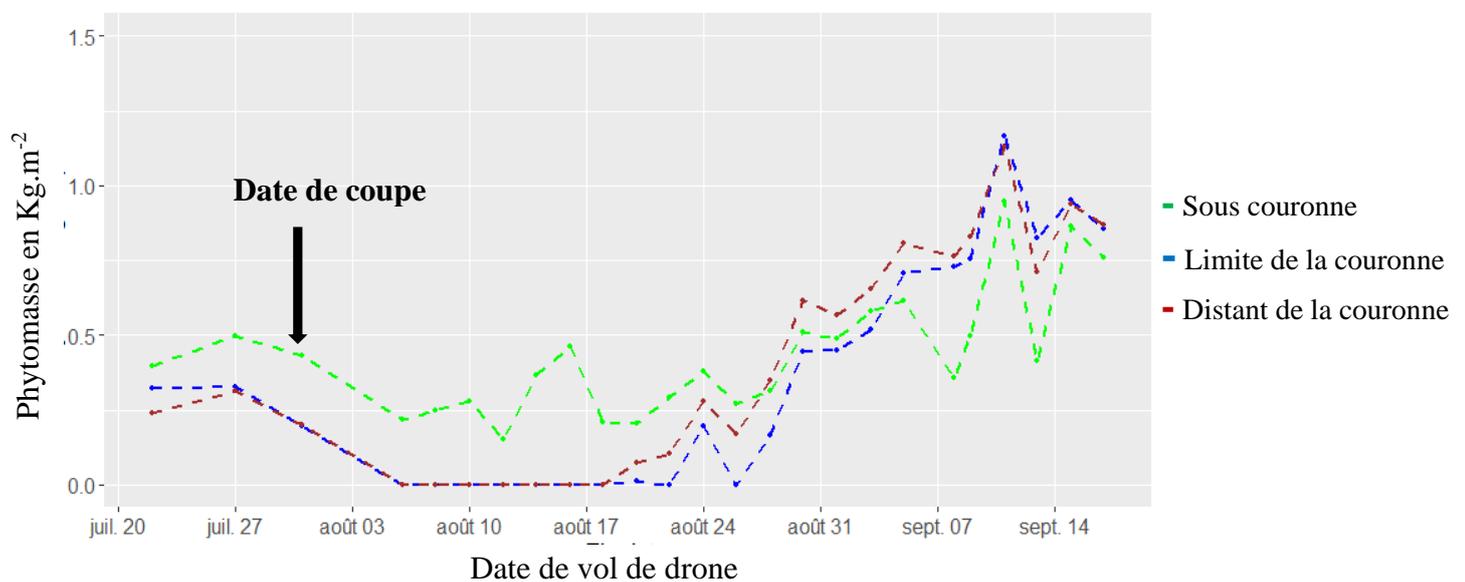


Figure 16 : Dynamique de la phytomasse sèche au sein des quadrats fauchés le 31/07/2020

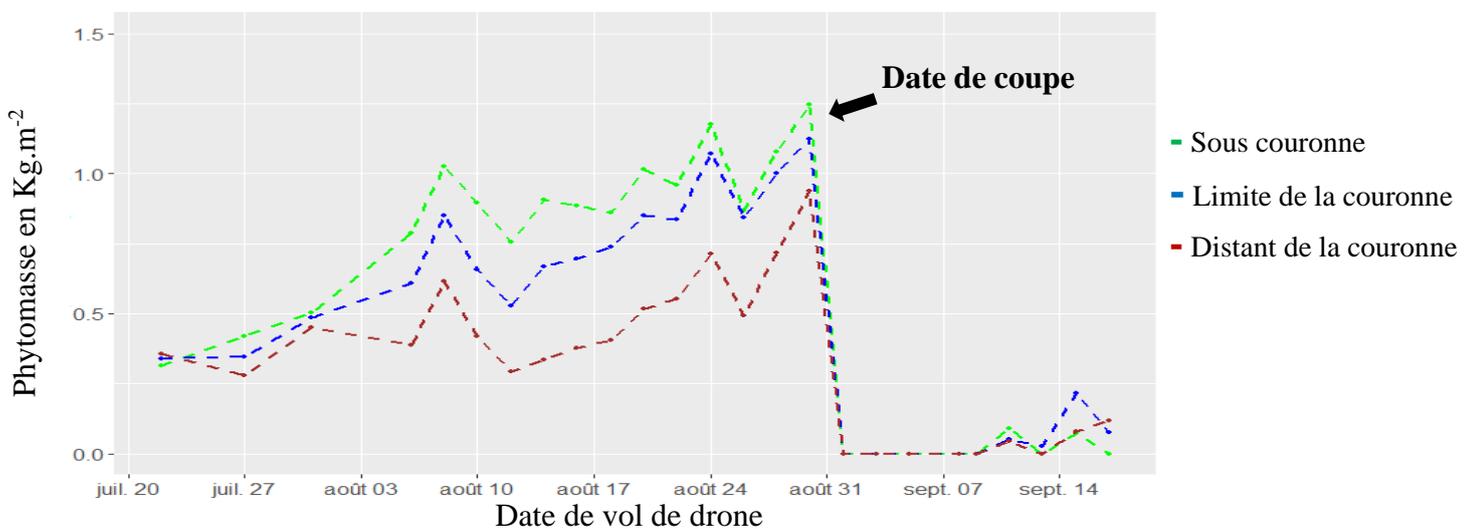


Figure 17 : Dynamique de la phytomasse sèche au sein des quadrats fauchés le 30/08/2020

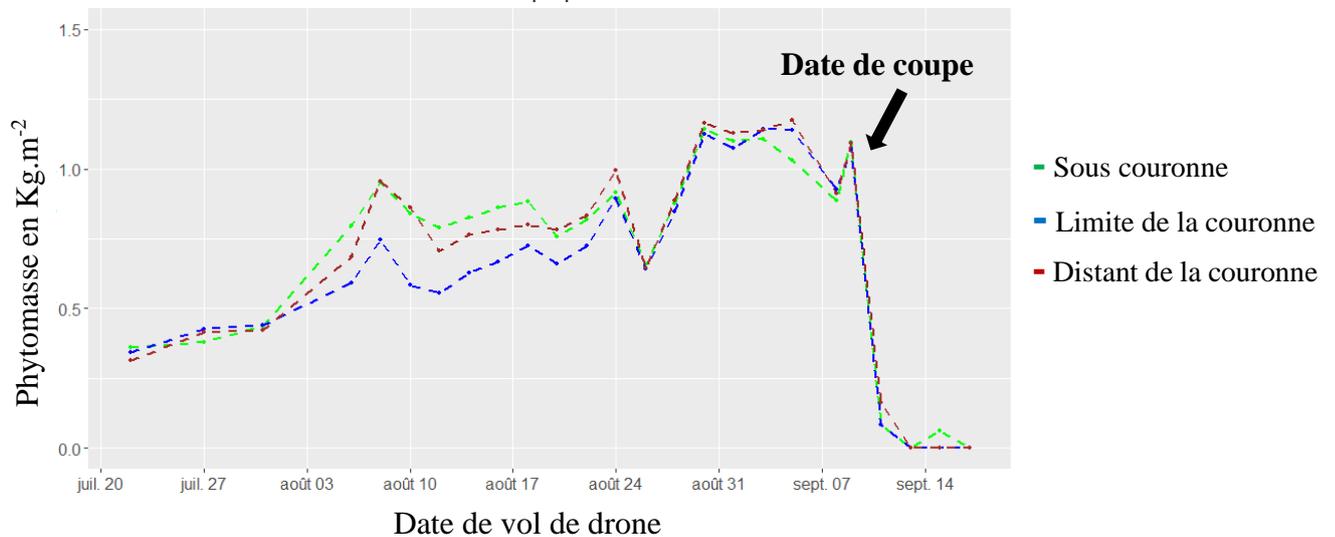


Figure 18 : Dynamique de la phytomasse sèche au sein des quadrats fauchés le 09/09/2020

Par ailleurs, on remarque sur les graphiques que la phytomasse sous arbre se retrouvent au-dessus de celles de à la limite de la couronne qui se retrouvent aussi au-dessus de celle distante de la couronne.

Pour pouvoir apprécier la dynamique de la phytomasse, des quadrats de 1m² ont été établis à de nouveaux emplacements sur les cartes de biomasse. Ces emplacements n'avaient pas fait l'objet de fauche pendant la période des mesures de terrain. Etant donné, qu'il n'a pas été possible de voir sous la couronne des arbres, seulement deux types de quadrats BC et DC ont été mis en évidence dans cette partie de l'étude. La distance à l'arbre fixée ici est de 9 m en ce qui concerne les quadrats DC. Cette distance a été choisie compte tenu de la densité et du taux de recouvrement des ligneux sur la parcelle et a été appliquée au niveau des arbres étudiés quel que soit leur âge.

La période de collecte des données a été divisée en trois parties à savoir : **Début saison** qui représente le début de la saison où nous avons l'apparition des premières pousses de la végétation et qui va jusqu'à l'apparition des premières fleurs (toute espèce confondue) qui marque le début de la deuxième période (**Milieu saison**). Le **Milieu saison** représente le milieu de la saison où la plupart des herbacées sur la parcelle ont atteint leur stade de développement

maximal. Cette période prend fin à l'apparition des premières senescences dans la végétation qui marque le début de la **Fin saison**.

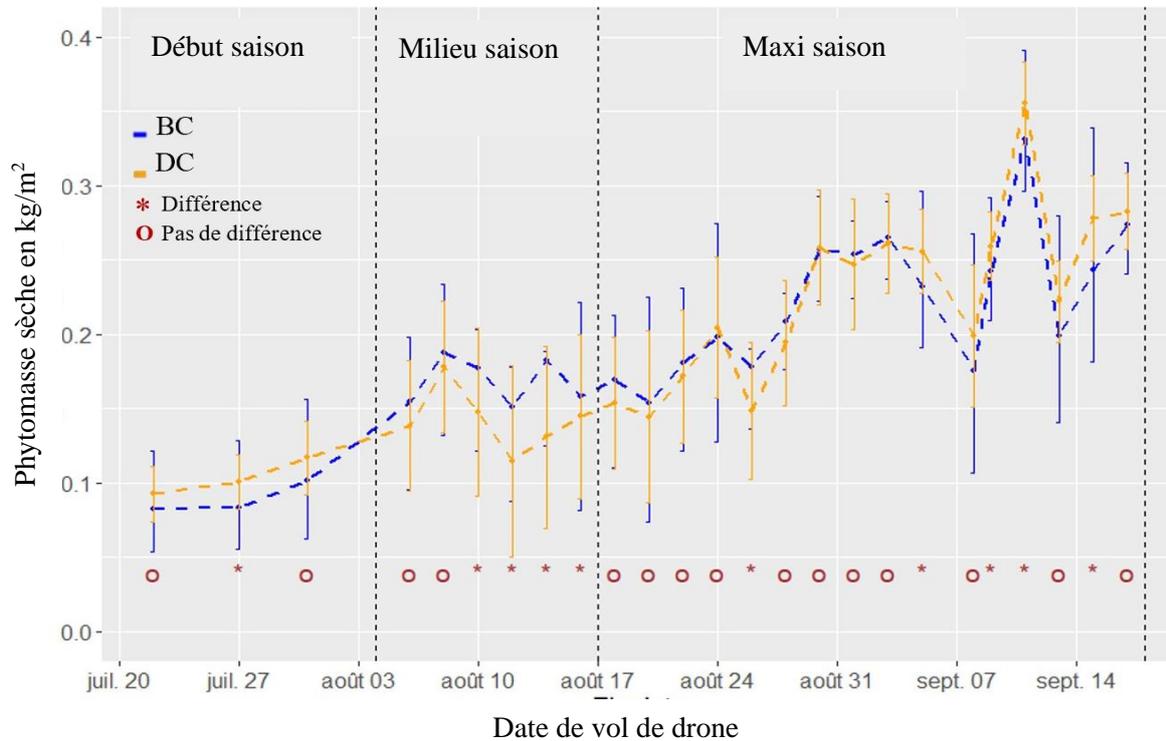


Figure 19 : Dynamique naturelle de la phytomasse sèche au sein de BC et DC.

L'analyse du graphique montre que la phytomasse sèche au sein des quadrats BC et DC augmente selon qu'on quitte le début de la saison vers la fin de la saison. Puis on constate des chutes importantes le 08 septembre et le 11 septembre, et une hausse importante le 09 septembre, mais ces gaps sont démentis dès 15 septembre.

Le test T de Student effectué, pour comparer la phytomasse sèche BC à celle DC pour chaque date de mesure, montre que la différence est significative à certaines dates et non significative à d'autres dates. En effet, sur la première période du graphique (Début saison) où il a été représenté 03 dates, la différence entre BC et DC est significative seulement pour la date du 27 juillet et non significative pour les deux autres dates. Sur la 2^{ème} période du graphique il y a une différence significative entre les quadrats des quatre dernières dates de vol sur six dates de vols représentées. Et sur la 3^{ème} période du graphique la différence est constatée sur 5 dates sur les 21 dates vol.

Les graphiques suivants présentent la répartition des moyennes de la phytomasse sèche par position de quadrat pour chacune des trois périodes ; chaque période étant considérée comme un échantillon.

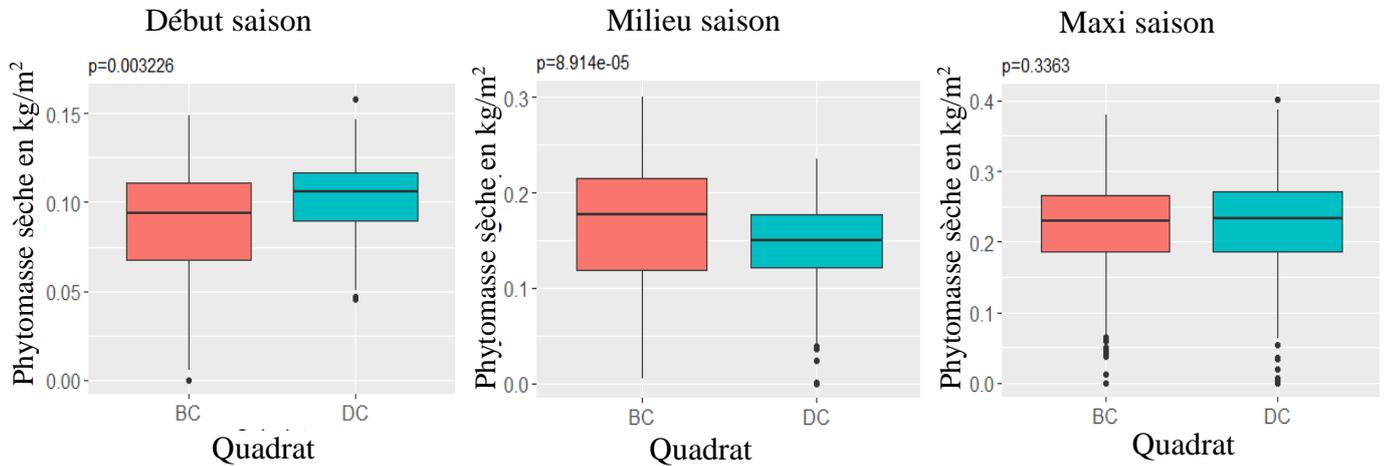


Figure 20 : Comparaison entre BC et DC sur trois périodes de la saison

Les résultats montrent qu'il y a une différence significative entre BC et DC en début de saison et en milieu de saison. Mais plus précisément, pendant la période de début de saison la phytomasse herbacée à la limite de la couronne des arbres est moins importante que celle distante de la couronne des arbres et en milieu de saison la phytomasse à la limite de la couronne des arbres devient plus importante que celle distante de la couronne des arbres. Sur la période Fin saison, il n'y a pas de différence significative entre BC et DC.

Dynamique de la phytomasse au niveau des espèces d'arbre de la parcelle

Les figures 21 et 22 suivantes présentent la dynamique de la phytomasse sèche BC et DC respectivement au niveau du *Vachellia tortilis* et du *Balanites aegyptiaca*.

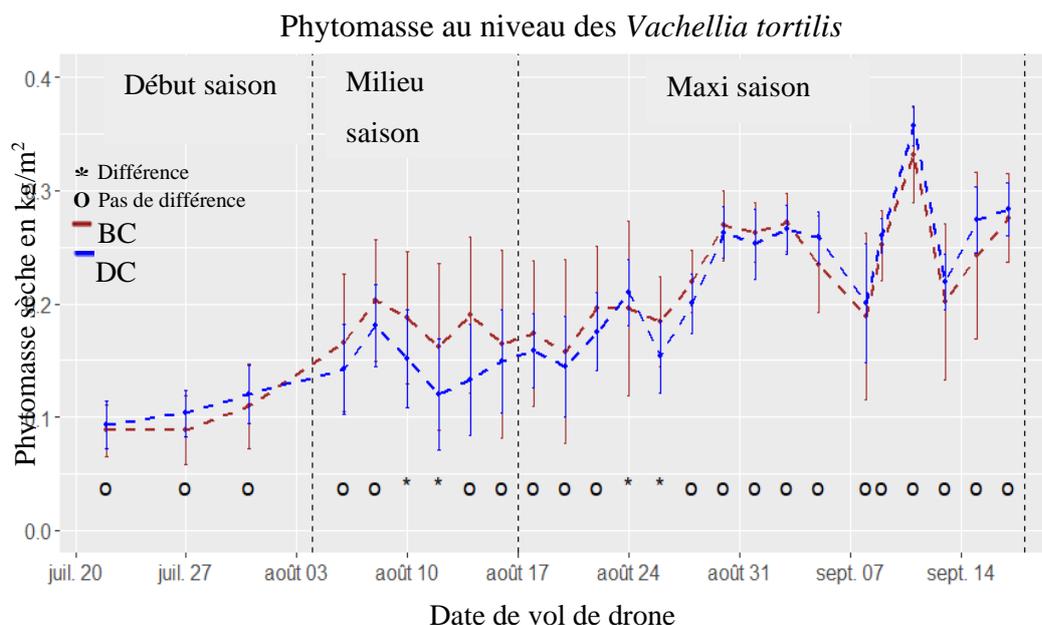


Figure 21 : Dynamique de la phytomasse sèche au niveau de *Vachellia tortilis* dans un écosystème sahélien

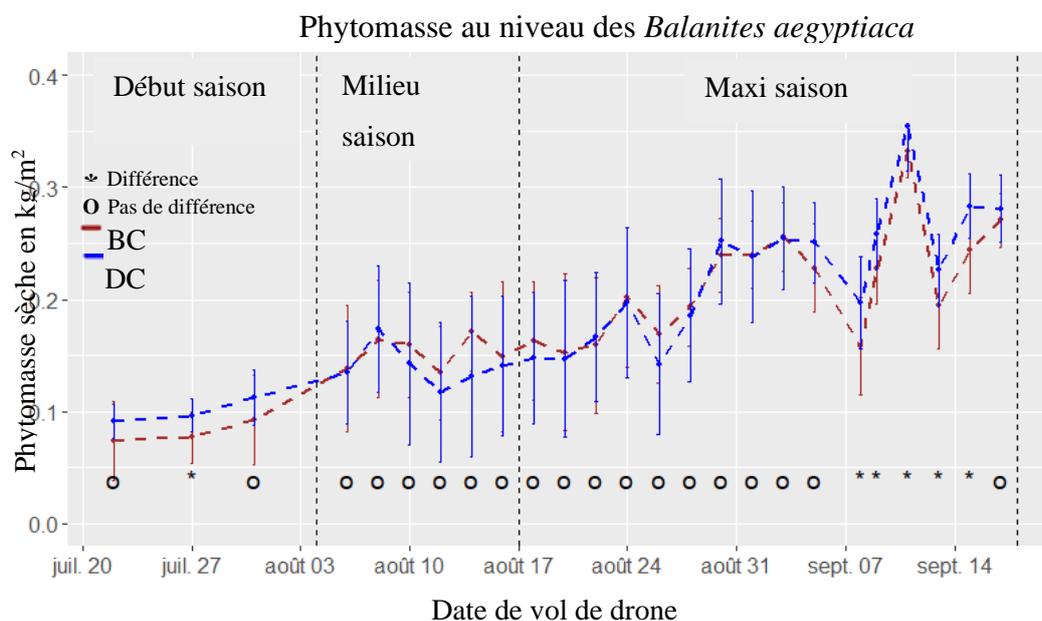


Figure 22 : Dynamique de la phytomasse sèche au niveau de *Balanites aegyptiaca* dans un écosystème sahélien

L'allure des courbes sur ces deux graphiques est comparable à celle de la dynamique naturelle de la phytomasse de la parcelle avec des chutes et hausses importantes aux mêmes dates qui se sont corrigées après. La plupart des grandes valeurs de la phytomasse sont observées à la limite de la couronne pour les deux espèces d'arbres et à plusieurs dates de vol la différence est

significative entre BC et DC. Pour *Vachellia tortilis* la différence est remarquable en milieu de saison et en début de la fin saison. Il s'agit des dates du 10/08/2020 et du 12/08/2020 en milieu de saison et des dates du 24/08/2020 et du 26/08/2020 en fin saison. Pour *Balanites aegyptiaca*, la différence est remarquable pour un jour en début de saison et pour cinq (05) jours vers la fin de la Fin saison. Il s'agit de la date du 27/07/2020 en début de saison et de cinq dates successives (les 08, 09, 11, 13,15 septembre 2020) en Fin saison.

3.3. Etude de la distance d'influence des arbres sur la variation du couvert herbacé

D'abord une comparaison a été faite entre les phytomasses selon la distance à l'arbre aux différentes périodes de la saison pluvieuse. Les boîtes à moustache qui suivent présentent la répartition des masses sèches BC et des masses sèches DC au niveau des deux espèces d'arbres par niveau de la saison.

Début de saison

En ce qui concerne l'ensemble des masses sèches du début de la saison, on remarque que DC est légèrement plus importante que BC au niveau des deux espèces d'arbres. Puis au niveau de *Balanites aegyptiaca*, il y a une différence entre les phytomasses DC et les phytomasses BC avec une p-value=0,006. Alors qu'il n'y a pas de différence significative entre les masses BC et DC au niveau de *Vachellia tortilis*. Par ailleurs, en valeur absolue, la moyenne de la phytomasse herbacée à la limite de la couronne de *Vachellia tortilis* est au-dessus des 0,1 kg MS/ha légèrement plus importante que celle de *Balanites aegyptiaca* en début de saison (Figure 23).

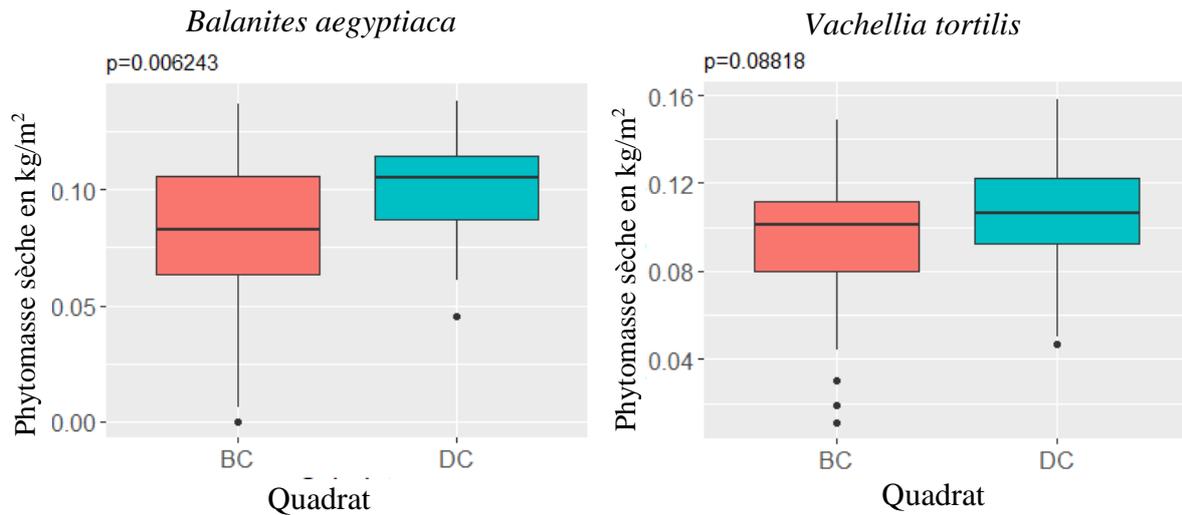


Figure 23 : Comparaison de la phytomasse à la limite de la couronne et distante de la couronne au niveau de *Balanites aegyptiaca* et *Vachellia tortilis* en début de saison pluvieuse dans un écosystème sahélien.

Milieu de la saison

En cette période de la saison, les phytomasses BC sont plus importantes en valeur absolue que les phytomasses DC au niveau des deux espèces. Puis il y a une différence significative entre les phytomasses BC et DC prises au niveau de *Vachellia tortilis* ce qui n'est pas le cas pour *Balanites aegyptiaca* où il n'y a pas de différence significative entre les phytomasses BC et DC (Figure 24).

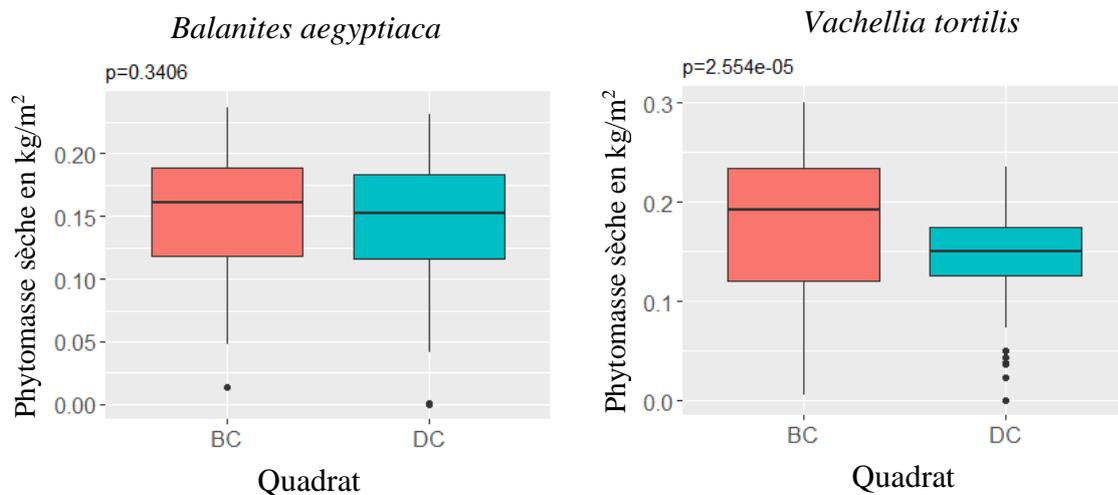


Figure 24 : Comparaison de la phytomasse à la limite de la couronne et distante de la couronne au niveau de *Balanites aegyptiaca* et *Vachellia tortillis* en milieu de saison pluvieuse dans un écosystème sahélien

Fin de saison

L'analyse des données de la Fin saison montre que pour *Vachellia tortillis*, BC est comparable au DC et qu'il n'y a pas de différence significative entre les deux. Ce qui n'est pas le cas au niveau de *Balanites aegyptiaca* où DC est plus importante que BC et DC et il y a bien des différences entre les deux (Figure 25).

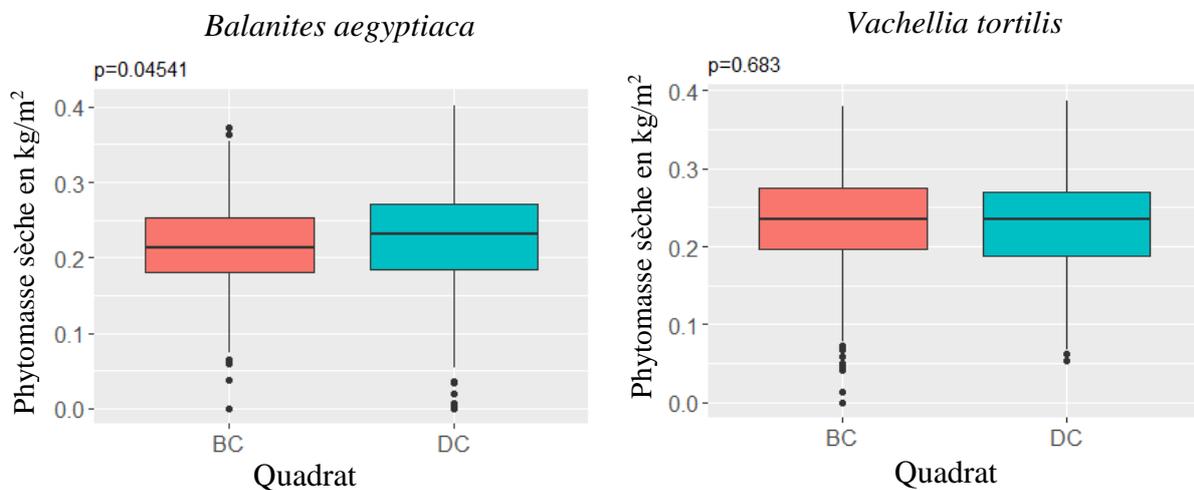


Figure 25 : Comparaison de la phytomasse à la limite de la couronne et distante de la couronne au niveau de *Balanites aegyptiaca* et *Vachellia tortillis* vers fin de saison pluvieuse dans un écosystème sahélien

L'établissement du variogramme a permis d'étudier la variabilité de la phytomasse sèche herbacée selon qu'on s'éloigne de l'arbre sur la parcelle, à chaque date de mesure. Il n'a pas été automatisé un variogramme pour toutes les cartes de biomasse, chacune d'elles nécessitait des ajustements spécifiques. Ainsi, un modèle de variogramme a-t-il été ajusté pour chaque carte de biomasse.

La Figure 26 présente le variogramme de la carte de biomasse du 15/09/2020. Chaque point bleu est un décalage du variogramme expérimental. L'axe des abscisses représente la distance entre les paires de points, et l'axe des ordonnées représente la valeur calculée du

variogramme, où une valeur plus élevée indique une corrélation moindre entre les paires de points.

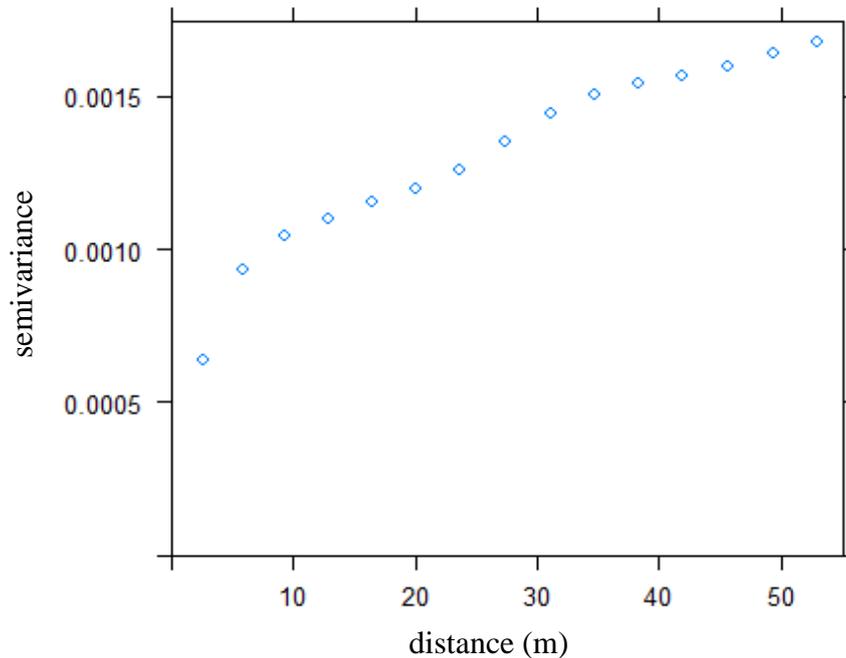


Figure 26 : Construction du variogramme expérimental : cas de la carte de biomasse du
15/09/2020

Le variogramme expérimental ainsi établi, l'objectif est d'ajuster un modèle de semi-variogramme aux données pour décrire au mieux la structure spatiale du jeu de données pour cette date de vol. Certains paramètres de la fonction variogramme du package GSTAT ont été réglés pour une caractérisation plus fine du variogramme. Principalement il a été question d'agir sur la distance spatiale maximale prise en compte entre deux observations et l'intervalle de distance sur lequel la semi-variance est calculée, pour être sûr que le variogramme soit affiché correctement et que l'information utile n'est pas perdue. Pour l'ensemble des variogrammes, on suppose que le système est isotopique i.e. les phénomènes n'évoluent pas différemment en fonction d'une direction d'intérêt dans l'espace (Figure 27).

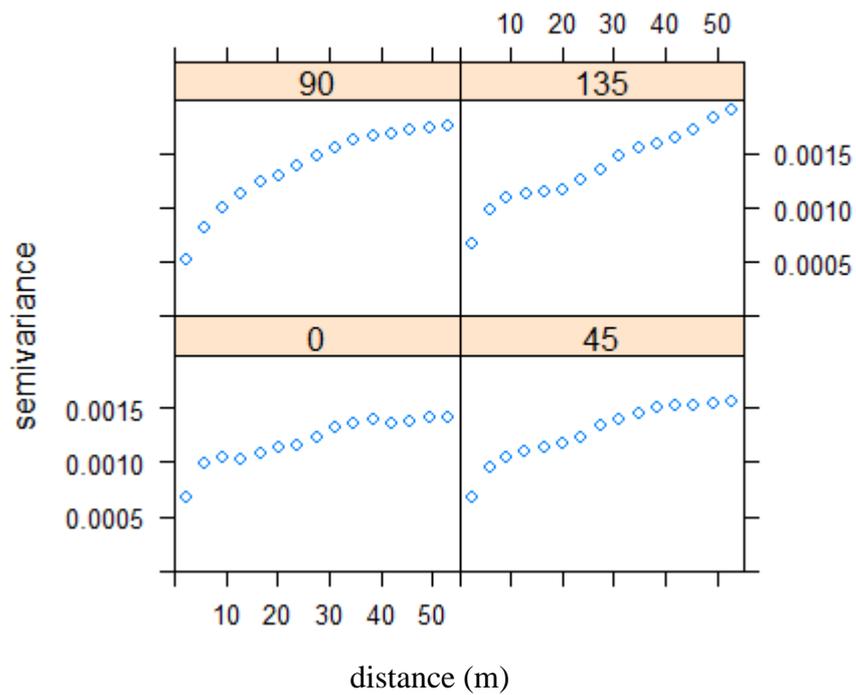
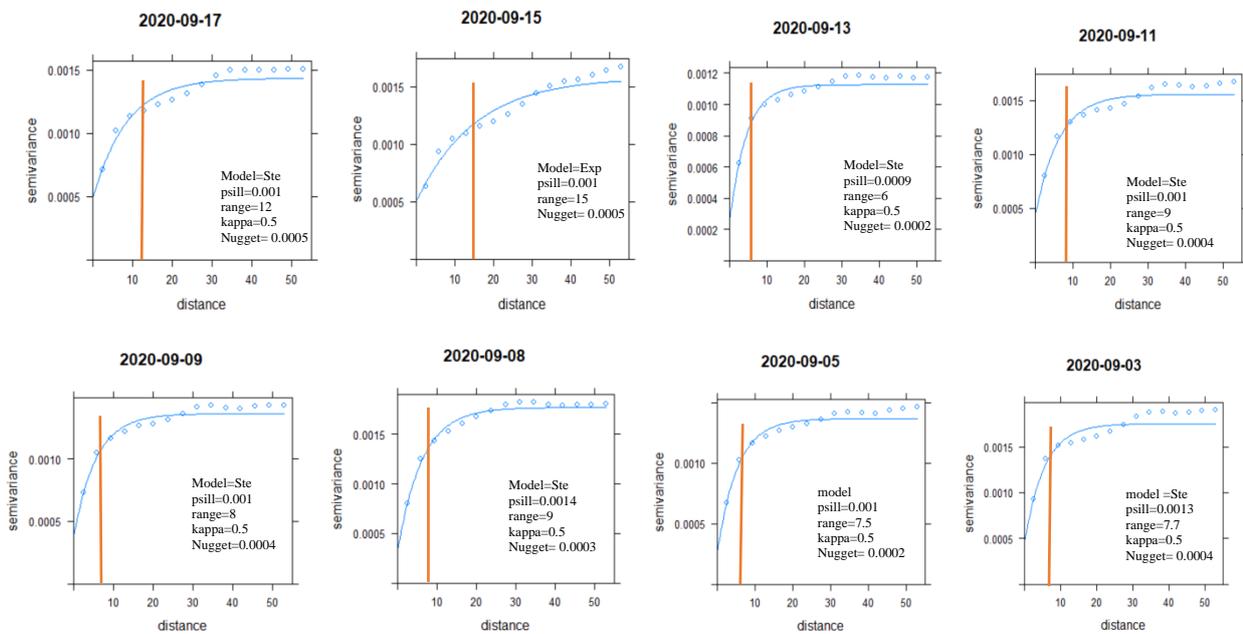


Figure 27 : Variogrammes directionnels, pour les quatre directions des arbres : cas de la carte de biomasse du 15/09/2020 d'un écosystème sahélien

Les variogrammes obtenus après ajustement des meilleurs modèles sont présentés à la figure 31.



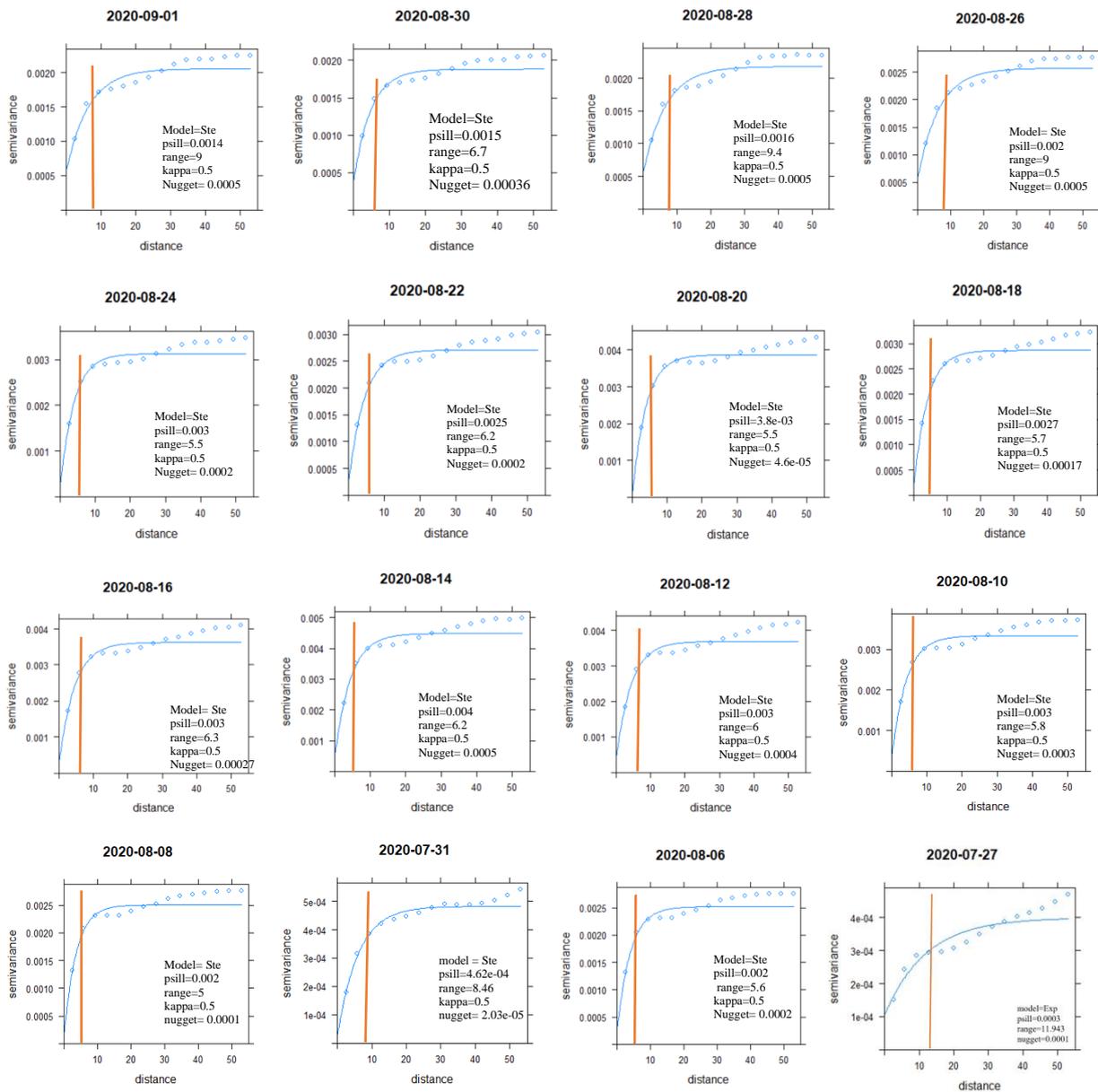


Figure 28 : Variogrammes de la phytomasse pour chaque date de vol.

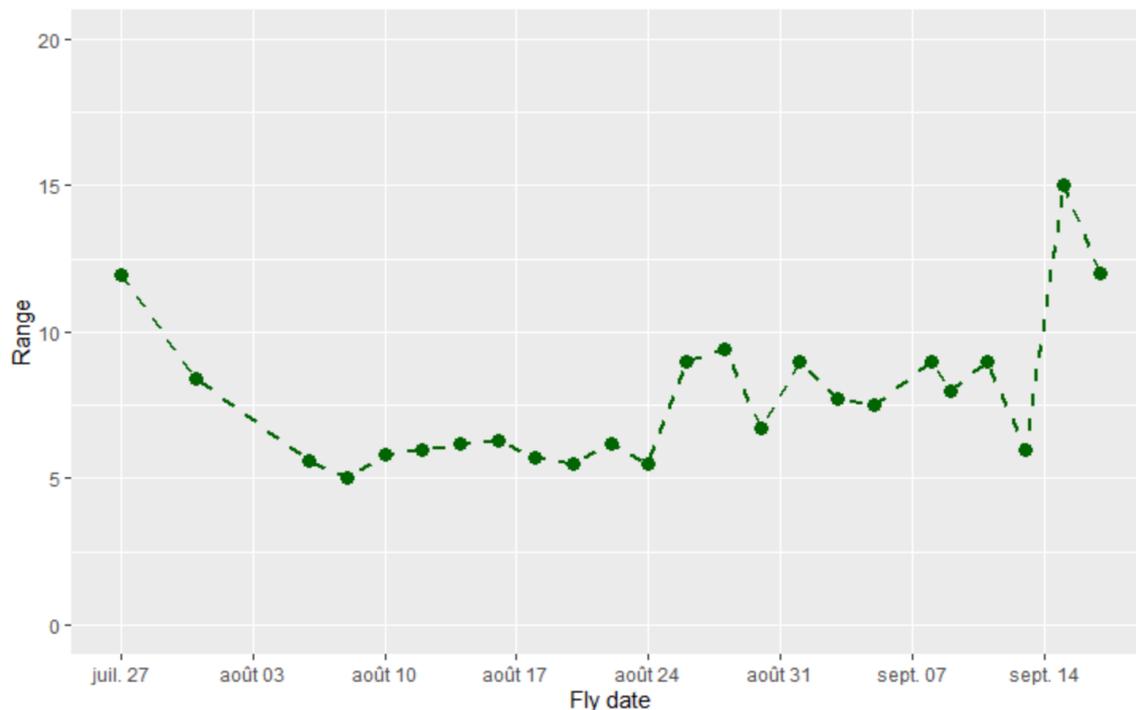


Figure 29 : Variation de la distance d'influence de l'arbre durant la saison

L'effet de la distance à l'arbre analysé à l'aide du variogramme montre que l'arbre influence la variation de la phytomasse sèche jusqu'à une distance minimum de cinq (05) mètres de la couronne et à une distance maximum de quinze (15) mètres de la couronne. Les phénomènes qui ont donné naissance ces résultats ont été considérés comme isotropiques, c'est à dire qu'ils n'évoluent pas différemment en fonction d'une direction d'intérêt dans l'espace. Ce qui est rare dans la nature puisque les conditions édapho-climatiques et de relief peuvent différer d'une direction à l'autre dans l'espace et par rapport à l'arbre et par espèce d'arbre. Bien que le facteur pente puisse être négligeable sur la parcelle étudiée, les autres facteurs extérieurs comme la température, la composition du sol, etc. peuvent influencer la performance du variogramme. Ainsi le calcul du variogramme pour chaque journée de collecte permet de minimiser les limites de l'isotropie et d'avoir les variations possibles de la distance d'influence de l'arbre qui varie entre 05 à 11 mètres en début de saison et va jusqu'à 15 mètres vers la fin de la saison sur la parcelle étudiée.

4. Discussion

5.1 Calibration entre les données du drone et les paramètres de la strate herbacée mesurés sur le terrain

L'intérêt d'utiliser les indices colorés pour étudier la phytomasse a été démontré (Lussem et *al.*, 2018). Dans la présente étude il a été établi des relations entre les bandes RVB, les indices colorés et les données du DSM, à partir des méthodes linéaires empiriques pour prédire la variation de la strate herbacée. Ceci permet de réduire les erreurs dans l'établissement des équations de prédiction pour la calibration des mosaïques RVB (Lussem et *al.*, 2018 ; Bossoukpe, 2020 ; Taugourdeau et *al.*, 2022).

Les modèles de prédiction établis varient compte tenu du paramètre de végétation considéré. Non seulement le drone RVG peut prédire la variation de la masse fraîche et de la phytomasse sèche, mais aussi la variation d'autres paramètres de la strate herbacée tels que le taux de recouvrement, le taux de feuillaison, le taux de floraison et le taux de sénescence. Les plus grandes valeurs du R^2 obtenues sont pour les variations de la biomasse avec un $R^2=0.67$ pour la masse fraîche et $R^2 = 0.65$ pour la phytomasse sèche. Puis le recouvrement, la feuillaison, la floraison et la sénescence respectivement de $R^2 = 0.36$, $R^2 = 0.39$, $R^2 = 0.37$, $R^2 = 0.14$. Il faut noter que la variation de la strate herbacée est très liée à la réflectance dans le rouge. La réflectance dans le rouge apparaît dans la prédiction de tous les paramètres de végétation étudiés avec une contribution très significative aux différentes équations de régression. En effet, ce flux de rayonnement électromagnétique, comme l'infrarouge d'ailleurs, est directement lié à la biomasse végétale. L'intégration du proche infrarouge ou de l'infrarouge dans les variables pourrait donc améliorer les modèles surtout pour la prédiction des taux de recouvrement, de feuillaison, de floraison et de sénescence dont les performances sont faibles dans le visible. L'hyperspectre peut également mieux saisir les plages dans la végétation et le stress au niveau des plantes mais aussi la qualité du fourrage (Poley et *al.*, 2020 ; Wijesingha et *al.*, 2020 ; Gavelle, 2015). La réflectance dans le vert (Green) et la hauteur moyenne de la végétation issues de la 3D interviennent dans l'estimation de quatre (04) paramètres de végétation sur six (06), la réflectance dans le bleu (Blue) et les indices GLI, NDGRI et NDBRI expliquent la variation de trois (03) paramètres de végétation sur six (06) et le NDBGI intervient uniquement dans la variation du taux de recouvrement. Cette étude montre que les données issues de la SfM (mosaïque RVB et DSM) permettent d'étudier la strate herbacée.

4.2. Etude de la dynamique de la biomasse du couvert herbacé par SfM.

Les cartes de biomasse ont permis d'établir les courbes de tendance de la phytomasse sèche du couvert herbacé. La dynamique naturelle (Figure 19), indique une augmentation de la phytomasse sèche selon qu'on quitte le début de la saison vers la fin de la saison dans les unités d'échantillonnage (Diatta *et al.*, 2021). Les gaps sur la biomasse à la limite de la couronne (BC) et distant de la couronne (DC) seraient liés à la qualité des images photographiques qui est influencée par de nombreux facteurs comme le vent, la couverture nuageuse et l'intensité de la lumière solaire. Ces gaps peuvent se remarquer aussi aux mêmes dates sur les courbes des Figures 21 et 22. En effet, il faut noter que la correction des couleurs n'a pas été effectuée. La plupart des vols de drone a été effectué très tôt le matin mais certains vols ont eu lieu sous d'autres conditions de rayonnement solaire aux dates 08/09/2020 et 13/09/2020 parce qu'il y a eu pluie. Rasmussen *et al.* (2016) suggèrent qu'afin d'éviter des effets indésirables sur les images obtenues par les ASP, les images doivent être acquises par temps complètement nuageux ou lorsque l'angle d'incidence de la lumière est le même que l'orientation de la caméra afin que les conditions d'éclairage soient les meilleures. Les indices sont sujets à des variations de leurs valeurs en raison de plusieurs facteurs, principalement la présence d'ombres, la luminosité solaire et le mélange de pixels, qui ne reflètent pas l'état réel de la surface (Bannari *et al.*, 1995). Par ailleurs, les logiciels de mosaïquage peuvent provoquer la présence de taches en raison des changements d'angle de réflexion de la lumière (Rasmussen *et al.*, 2016). Face à ce problème, Ortega-Terol *et al.* (2017) ont développé un logiciel pour la planification des vols, le traitement des images acquises par les ASP et la détection des zones présentant des changements dans la réflectance de la lumière du soleil. Leur analyse a fourni ainsi un outil supplémentaire pour la détection du bruit dans les orthomosaïques. Cela pourrait s'appliquer à nos données.

En outre, la SfM par drone RVB permet de détecter les changements dans la croissance de la végétation en l'occurrence l'effet de la fauche (Figure 18). Elle permet aussi d'apprécier la différence entre les masses sèches BC (à la limite de la couronne) et DC (distant de la couronne) (Figure 20) et au niveau des pieds de *Balanites aegyptiaca* et de *Vachellia tortilis* de la parcelle (Figure 21 à Figure 25). Cela met en évidence l'effet positif de l'arbre sur la production de la masse herbacée. Akpo *et al.* (2003) avaient observé que ces deux espèces d'arbres pouvaient influencer la strate herbacée hors couronne. Les études qui se sont intéressées à la question sont basées sur des méthodes de mesures traditionnelles et ont montré que l'arbre augmente la diversité floristique herbacée et a un effet positif sur le développement des espèces et la quantité

du fourrage produit (Grouzis et *al.*, 1991 ; Akpo et *al.*, 1997; Akpo et *al.*, 2003 ; Ngom et *al.*, 2012). Bien que les images issues de l'analyse PIX4D ne permettent pas de déterminer la composition spécifique de la strate herbacée, elles ont permis d'apprécier l'impact des arbres de la parcelle sur la biomasse.

4.3. Etude de la distance d'influence des arbres sur la variation du couvert herbacé

L'arbre est un composant essentiel des écosystèmes sahéliens. Plusieurs chercheurs ont essayé d'étudier l'effet de la distance de l'arbre sur la strate herbacée. Une étude de Akpo et *al.* (1997) portant sur l'influence du couvert ligneux sur la strate herbacée démontre que l'aire d'influence de l'arbre s'étend au-delà de sa couronne. Le traitement de ses données s'est basé sur l'analyse factorielle des correspondances appliquée à des données de relevés floristiques, sous couvert et hors couvert des arbres. D'autres expérimentations ont fait recours à des mesures plus complexes utilisant des placettes en anneaux disposées autour des arbres (Louppe et *al.*, 1996), des spirales logarithmiques (Tomlinson et *al.*, 1998) et des transects entre les arbres.

En réponse à la difficulté des mesures sur le terrain, Bayala et *al.*, (2015) ont proposé une méthode d'étude de la distance d'influence de l'arbre basée sur la cartographie et une approche géostatistique. Cette méthode a pris de l'extension avec l'avènement des drones civiles. En 2020, Roupsard et *al.* ont développé une nouvelle méthode basée sur l'utilisation des indices spectraux (NDVI et MSAVI2) pris par drone et à l'aide de la géostatistique pour évaluer la distance d'influence de *Faidherbia albida* sur le rendement d'une culture de mil. Leurs résultats montrent qu'à partir de 17 mètres de la couronne, *Faidherbia albida* n'a plus d'effet sur la culture du mil. Agbohessou (2020) a mené une étude similaire dans le même milieu et a démontré que *Faidherbia albida* a une distance d'influence de 9 mètres sur le rendement de l'arachide.

La grande quantité de biomasse obtenue sous et à la limite de la couronne des arbres, dans nos résultats, peut être considérée comme l'effet direct de la litière ligneuse, ou comme un effet secondaire lié à l'évapotranspiration réduite permettant une meilleure croissance des plantes herbacées (Bernhard-Reversat, 1982). L'effet de l'arbre en dehors de la couronne peut être expliqué par la capacité des arbres à améliorer le sol du milieu par l'apport de litières et de résidus racinaires qui contribue au maintien du niveau de la matière organique dans le sol et à l'amélioration de la fertilité (Aggarwal, 1980 ; Radwanski et Wickens, 1981 ; Virginia, 1986) à l'échelle de la parcelle ou du système d'exploitation. Des études comparatives des propriétés

du sol sous cimes des arbres et dans un environnement sans arbres ont montré que les plantes se développent deux à trois fois plus vite dans un milieu ayant une couverture ligneuse que dans un milieu sans arbres (Verinumbe, 1987 ; Young, 1995). Mais plus encore les ligneux peuvent améliorer les propriétés du sol dans un rayon de 6 à 10 m (Altieri et *al.*, 1987).

Nos résultats relatifs à la distance d'influence des arbres sur le développement de la strate herbacée qui est de 5 à 15 mètres, vont dans le même sens que tous ces travaux énumérés.

Le suivi dans le temps des systèmes écologiques permet aussi de déterminer la distance d'influence moyenne des arbres sur la croissance ou le développement de la phytocénose herbacée. Sur la parcelle ayant fait l'objet de notre étude, la distance moyenne d'influence de l'arbre, durant la saison, est de 7,7 mètres. Ces résultats montrent l'importance de l'impact de l'arbre et la nécessité de sa prise en compte dans la restauration des écosystèmes du Sahel, en particulier le Ferlo. Cela permettra aussi une meilleure gestion de la composante arbre dans ces systèmes, par une optimisation de sa densité pour améliorer la production du fourrager et le rendement des cultures (Agbohessou, 2020 ; Roupsard et *al.*, 2020). D'autres part, cette étude permet de mieux appréhender l'intégration de l'arbre dans la restauration des écosystèmes du Sahel, en particulier le Ferlo. La bonne gestion de la densité des arbres au sein des parcours pastoraux peut permettre de prolonger la durée de vie des herbacées pour le bétail (Akpo et *al.*, 2003) et améliorer la résilience des écosystèmes aux perturbations surtout climatiques.

Conclusion

Cette démarche basée sur l'utilisation du drone est assez innovante puisqu'elle a permis d'aborder plusieurs questions d'intérêt scientifique telles que la dynamique de la phytomasse et éventuellement d'autres paramètres de végétation. En effet, ce travail montre la potentialité du drone RVB à étudier la phytomasse, le taux de recouvrement, le taux de floraison, le taux de feuillaison, et le taux de sénescence de la végétation herbacée. Aussi, l'étude a-t-elle apporté un plus à la question sur l'impact des arbres sur la végétation herbacée au Sahel. L'impact de l'arbre s'étend en effet à 5m au minimum à partir de la limite de la couronne jusqu'à 15m au maximum. Et plus encore cet impact serait plus lié à l'effet fertilité de l'arbre. L'utilisation du drone pour étudier la végétation apparaît pertinente et intègre des enjeux techniques et économiques et sécuritaires.

Perspectives

Une détection multispectrale de la végétation pourrait faire l'objet d'essais dans l'avenir. L'amélioration des résultats de ce travail pourrait intégrer la prise en compte des spécificités liées à chaque pied d'arbres tels que la diversité spécifique ; la hauteur et l'âge des arbres. Par ailleurs, dans une étude de Kellman (1980), la mise en évidence des racines des arbres a montré des systèmes étonnement peu profonds, qui ont conduit à attribuer l'effet positif de l'arbre non pas à l'extraction d'éléments des horizons profonds du sol, mais à l'effet cumulatif dans le temps de la rétention préférentielle d'éléments nutritifs apportés par l'atmosphère, conduisant à un cycle nutritif plus riche entre le sol et l'arbre sous ce dernier. Cet argument peut être consolidé par notre méthodologie (qui intègre une dimension temporelle) dans un système d'exploitation mixte où les arbres y seront nouvellement plantés, pour voir l'évolution de l'influence de l'arbre sur la variation de la végétation herbacée qui exploite les éléments nutritifs des horizons peu profonds du sol.

Références

- Agbohessou, Y. F. U. (2020). *Effets du *Faidherbia albida* (Del.) A. Chev. sur la productivité aérienne et souterraine de l'arachide (*Arachis hypogaea* L.) : estimation du rendement et du Land-Equivalent-Ratio partiel de l'arachide (LERcp) par drone*. UNIVERSITÉ CHEIKH ANTA DIOP.
- Akpo, L. E., Banoïn, M., et Grouzis, M. (2003). Effet de l'arbre sur la production et la qualité fourragères de la végétation herbacée : Bilan pastoral en milieu sahélien. *Revue de Médecine Veterinaire*, 154(10), 619–628.
- Akpo, L. E., Samb, P. I., et Grouzis, M. (1997). Effet du couvert des arbres sur la structure spécifique de la strate herbacée en savane subhumide soudanienne (Sénégal, Afrique de l'Ouest). *Conservatoire et Jardin Botaniques de Genève*, 52(2), 287–299.
- Audry, P. (1962). *Etude pédologique du Centre de Recherches Zootechniques de Dahra-Djolloff (République du Sénégal)*. 131.
- Bannari, A., Morin, D., Bonn, F., et Huete, A. R. (1995). A review of vegetation indices. *Remote Sensing Reviews*, 13(1–2), 95–120. <https://doi.org/10.1080/02757259509532298>
- Barral, H. (1983). *Systemes de production d'élevage au Sénégal dans la region du Ferlo : synthèse de fin d'études d'une équipe de recherches pluridisciplinaire*. 172.
- Barry, J. P., Boudet, G. (Gabriel), et Bourgeot, A. (1983). Etude de potentialités pastorales et de leur évolution en milieu Sahélien au Mali/République française, Ministère de la Recherche et de l'Industrie, Département recherche et technologie dans les zones tropicales et arides. *ORSTOM*, 114.
- Bassène, C., Diallo, M. D., Diaté, B., Diop, A., et Guissé, A. (2020). Caractéristiques de la végétation herbacée d'une parcelle mise en défens dans le Ferlo Nord au Sénégal. *Revue d'élevage et de Médecine Vétérinaire Des Pays Tropicaux*, 73(3), 207–212. <https://doi.org/10.19182/remvt.31895>
- Bayala, J., Sanou, J., Teklehaimanot, Z., Ouedraogo, S. J., Kalinganire, A., Coe, R., et van Noordwijk, M. (2015). Advances in knowledge of processes in soil-tree-crop interactions in parkland systems in the West African Sahel: A review. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 205, 25–35. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2015.02.018>
- Billen, L. (2016, May). *Image à la une : jardins féminins aux portes du Sahel* —

Géoconfluences. Géoconfluences. <http://geoconfluences.ens-lyon.fr/informations-scientifiques/a-la-une/image-a-la-une/image-a-la-une-jardins-feminins-sahel>

- de Vries, P. F. W. T., et Djiteye, M. A. (1982). La Productivité des Pâturages Sahéliens—Une Étude des Sols, des Végétations et de l’exploitation de Cette Ressource Naturelle. *Centre for Agricultural Publishing and Documentation, Wageningen*, 136(3), 190. <https://doi.org/10.1097/00010694-198309000-00006>
- Diallo, M., Mahamat-Saleh, M., Goalbaye, T., Ndiaye, O., Diop, A., et Guisse, A. (2017). Évolution de la diversité floristique des herbacées sous cinq espèces ligneuses dans la zone Nord Ferlo au Sénégal. *Les Cahiers de l’observatoire “Hommes-Milieus” International Téssékéré*, 6(April).
- Diatta, O., Ndiaye, O., Ngom, D., Diatta, S., Fensholt, R., Tagesson, T., et Taugourdeau, S. (2021). Réponses de la phytomasse herbacée aux fluctuations de la pluviométrie en milieu pâturé sahélien du Ferlo. *Fourrages*, 246, 95–105.
- Durand, A., Studer, M., Marchand, A. L., Mauris, F., et Richard, N. (2016). Suivi environnemental des herbiers de rivière par imagerie acquise par ULM et drone : Retour d’expérience et potentiel. *Houille Blanche*, 2016-Janua(1), 18–23. <https://doi.org/10.1051/lhb/2016003>
- Elie, A. L., Bada, F., et Grouzis, M. (2003). Diversité de la végétation herbacée sous arbre : variation selon l’espèce ligneuse en milieu sahélien. *Condollea*, 58(2. Candollea, Genève), 515–531.
- Gavelle, E. (2015). *Surveillance phytosanitaire des cultures de pommes de terre à l’aide de la télédétection par aéronef sans pilote*. Université de Sherbrooke.
- Greenwood, S. (2016). *Drones on the Horizon: new frontier in agricultural innovation*. ICT Update, pp. 2-3.
- Grouzis, M. (1988). *Structure, productivité et dynamique des systèmes écologiques sahéliens (mare d’oursi, Burkina faso)*. ORSTOM.
- Grouzis, Michel, Nizinski, J., et Akpo, E. (1991). L’arbre et l’herbe au Sahel : influence de l’arbre sur la structure spécifique et la production de la strate herbacée, et sur la régénération des espèces ligneuses. *ORSTOM, March*.

- Hiernaux, P., et Le Houérou, H. N. (2006). Les parcours du Sahel. *Secheresse*, 17(1–2), 51–71.
- King, K. F. S. (1987). The history of agroforestry. *Agroforestry*, 1.
- Leprun, J.-C. (1971). *Nouvelles observations sur les formations dunaires sableuses fixées du Ferlo nord occidental (Sénégal)- fdi:05414- Horizon*. Horizon. <https://www.documentation.ird.fr/hor/fdi:05414>
- Louppe, D., N'Dour, B., et Samba, A. (1996). Influence de *Faidherbia albida* sur l'arachide et le mil au Sénégal. Méthodologie de mesure et estimations des effets d'arbres émondés avec ou sans parcage d'animaux - Agritrop. In R. Peltier (Ed.), *Les parcs à Faidherbia* (CIRAD-Forêt, pp. 123–139). <https://agritrop.cirad.fr/391622/>
- Lussem, U., Bolten, A., Gnyp, M. L., Jasper, J., et Bareth, G. (2018). Evaluation of RGB-based vegetation indices from UAV imagery to estimate forage yield in Grassland. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences - ISPRS Archives*, 42(3), 1215–1219. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-3-1215-2018>
- Lykke, A. M., Kristensen, M. K., et Ganaba, S. (2004). Valuation of local use and dynamics of 56 woody species in the Sahel. *Biodiversity et Conservation* 2004 13:10, 13(10), 1961–1990. <https://doi.org/10.1023/B:BIOC.0000035876.39587.1A>
- Meneses-Tovar, C. L. (2011). L'indice différentiel normalisé de végétation comme indicateur de la dégradation. *Unasylva* 238, 62, 39–46.
- Ndiaye, O. (2015). *Déterminants de la dynamique de la végétation d'un milieu pâture en région sahélienne du Sénégal*. UNIVERSITE CHEIKH ANTA DIOP DE DAKAR ECOLE.
- Ndiaye, O., Diallo, A., Wood, S. A., et Guisse, A. (2014). Structural Diversity of Woody Species in the Senegalese Semi-Arid Zone—Ferlo. *American Journal of Plant Sciences*, 5(3), 416–426. <https://doi.org/10.4236/AJPS.2014.53055>
- Ngom, D., Bakhom, A., Diatta, S., et Akpo, L. (2012). Qualité pastorale des ressources herbagères de la réserve de biosphère du Ferlo (Nord-Sénégal). *International Journal of Biological and Chemical Sciences*, 6(1), 186–201. <https://doi.org/10.4314/ijbcs.v6i1.17>
- Niang, K., Ndiaye, O., Diallo, A., et Guisse, A. (2014). Flore et structure de la végétation ligneuse le long de la Grande Muraille Verte au Ferlo, nord Sénégal. *Journal of Applied*

Biosciences, 79(1), 6938. <https://doi.org/10.4314/jab.v79i1.15>

- Olson, D. M., Dinerstein, E., Wikramanayake, E. D., Burgess, N. D., Powell, G. V. N., Underwood, E. C., D'Amico, J. A., Itoua, I., Strand, H. E., Morrison, J. C., Loucks, C. J., Allnutt, T. F., Ricketts, T. H., Kura, Y., Lamoreux, J. F., Wettengel, W. W., Hedao, P., et Kassem, K. R. (2001). Terrestrial ecoregions of the world: A new map of life on Earth. *BioScience*, 51(11), 933–938. [https://doi.org/10.1641/0006-3568\(2001\)051\[0933:TEOTWA\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1641/0006-3568(2001)051[0933:TEOTWA]2.0.CO;2)
- Ortega-Terol, D., Hernandez-Lopez, D., Ballesteros, R., et Gonzalez-Aguilera, D. (2017). Automatic hotspot and sun glint detection in UAV multispectral images. *Sensors (Switzerland)*, 17(10), 1–16. <https://doi.org/10.3390/s17102352>
- Poley, L. G., Laskin, D. N., et Mcdermid, G. J. (2020). *Quantifying Aboveground Biomass of Shrubs Using Spectral and Structural Metrics Derived from UAS Imagery*. 12–14. <https://doi.org/10.3390/rs12142199>
- Quentin, T., Philippe, L., et Adeline, F. (2019). Miombo Par Imageries Drone Et. *Mathoe*.
- Rambal, S., et Cornet, A. (1982). Simulation de l'utilisation de l'eau et de la production végétale d'une phytocénose sahélienne du Sénégal. *Acta Oecologica. Série Oecologia Plantarum Montreuil*, 3(4).
- Rasmussen, J., Ntakos, G., Nielsen, J., Svensgaard, J., Poulsen, R. N., et Christensen, S. (2016). Are vegetation indices derived from consumer-grade cameras mounted on UAVs sufficiently reliable for assessing experimental plots? *European Journal of Agronomy*, 74, 75–92. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2015.11.026>
- Roupsard, O., Audebert, A., Ndour, A. P., Clermont-Dauphin, C., Agbohessou, Y., Sanou, J., Koala, J., Faye, E., Sambakhe, D., Jourdan, C., le Maire, G., Tall, L., Sanogo, D., Seghieri, J., Cournac, L., et Leroux, L. (2020). How far does the tree affect the crop in agroforestry? New spatial analysis methods in a *Faidherbia* parkland. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 296(March), 106928. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2020.106928>
- Saidou, O., Douma, S., Djibo, A. Z., et Fortina, R. (2010). *Analyse du peuplement herbacé de la station sahélienne expérimentale de Toukounous (Niger) : composition floristique et valeur pastorale*. 21(2), 7.
- Taugourdeau, S., Diedhiou, A., Fassinou, F. J. C., Bossoukpe, M., Diatta, O., N'Goran, A., et

- Faye, E. (n.d.). *Aboveground biomass of the herbaceous layer estimation in Sahelian rangelands from motion data collected on ground and by UAV* (p. 22). soumis.
- Tomlinson, H., Traore, A., et Teklehaimanot, Z. (1998). An investigation of the root distribution of *Parkia biglobosa* in Burkina Faso, West Africa, using a logarithmic spiral trench. *Forest Ecology and Management*, 107(1–3), 173–182. [https://doi.org/10.1016/S0378-1127\(97\)00340-X](https://doi.org/10.1016/S0378-1127(97)00340-X)
- Toutain, B., et Lhoste, P. (1978). Essai d'estimation du coefficient d'utilisation de la biomasse herbacée par le bétail dans un périmètre sahélien. *Revue d'élevage et de Médecine Vétérinaire Des Pays Tropicaux*, 31(1), 95. <https://doi.org/10.19182/remvt.8186>
- UA, et NEPAD. (2019). *Des Drones À L ' Horizon Transformer L ' Agriculture En Afrique*.
- Wijesingha, J., Astor, T., Schulze-Brüninghoff, D., Wengert, M., et Wachendorf, M. (2020). Predicting Forage Quality of Grasslands Using UAV-Borne Imaging Spectroscopy. *Remote Sensing*, 12(1), 126. <https://doi.org/10.3390/rs12010126>
- Young, A. (1995). *Agroforesterie pour la conservation du sol* (ICRAF).