

UNIVERSITÉ CHEIKH ANTA DIOP DE DAKAR



**FACULTÉ DES SCIENCES ET TECHNIQUES
DÉPARTEMENT DE BIOLOGIE VÉGÉTALE**

**Mémoire présenté pour l'obtention du Diplôme de Master en
Agroforesterie, Ecologie et Adaptation (AFECA)**

Présenté par :

M. Antoine DIEDHIOU

Sur le sujet :

**UTILISATION DE LA PHOTOGRAMMETRIE POUR
L'ÉVALUATION DES CARACTERISTIQUES DE COUVERTS
HERBACES AU SENEGAL**

Soutenu publiquement le vendredi 15 janvier 2021

Devant le jury composé de :

Président :	Mame Samba MBAYE	Maître de Conférences	BV/UCAD
Membres :	Daouda NGOM	Maître de Conférences	BV/UCAD
	Sékouna DIATTA	Maître Assistant	BV/UCAD
	Simon TAUGOURDEAU	Chargé de recherche	SELMET/CIRAD

Directeur de mémoire : Pr Daouda NGOM, Maître de Conférences (BV/UCAD),

Co-directeur : Dr Simon TAUGOURDEAU, Chargé de recherches (SELMET-CIRAD)

Dédicace

Je dédie ce travail à :

- mes parents particulièrement ma mère et mon père ;
- mes tantes et oncles ;
- mes frères, sœurs, cousins, cousines, neveux et nièces ;
- ma belle Famille ;
- mes ami(e)s.

Remerciements

Je remercie le président de jury professeur Mame Samba MBAYE Enseignant-chercheur Département de Biologie Végétale / FST Université Cheikh Anta Diop de Dakar d'avoir accepté de présider la séance de soutenance.

Je remercie les membres du jury, d'avoir accepté de siéger à ma soutenance, je ne saurais assez-vous dire merci

Je remercie le corp professoral et administratif des universités Cheikh Anta Diop (UCAD), et l'université Assane Seck de Ziguinchor (UASZ) qui ont contribué à la réussite de mes études.

Je remercie également mes encadreurs :

- Docteur Simon TAUGOURDEAU chercheur au CIRAD UMR SELMET, pour m'avoir donné l'opportunité de réaliser cette étude et d'avoir beaucoup appris intellectuellement et professionnellement, à ses côtés, je lui exprime mes sincères remerciements pour sa disponibilité, ses conseils précieux et pour son soutien durant toute la période d'élaboration du document et sa bienveillance tout au long de ce travail ;
- Professeur Daouda NGOM Enseignant-chercheur Département de Biologie Végétale / FST Université Cheikh Anta Diop de Dakar d'avoir accepté d'encadrer cette étude. Vos observations et suggestions pertinentes m'ont été très utiles, je voulais lui témoigner mes considérations pour avoir suivi l'élaboration du document ;
- Docteur Sékouna DIATTA, enseignant à l'UCAD et tous les enseignants du département de Biologie Végétale pour la formation ;
- Je remercie l'institut de convergence sur l'agriculture numérique #DigitAg qui a permis ce mémoire de voir le jour grâce à son financement, ainsi que ISRA et le PPZS pour l'accueil.
- Aux doctorants Ousmane DIATTA et Ange N'GORAN, et aussi l'étudiant Cofélas FASSINO pour le soutien aux travaux de collecte de données sur le terrain ;
- Un merci à toutes les équipes du CIRAD, ISRA et PPZS pour leur accueil et leur assistance ;
- Par ailleurs, je voudrais remercier également M. Moustapha DIA et M. Mamadou GASSAMA pour l'assistance technique ;
- Fatima DEMBELE pour l'assistance administrative ;
- Luc KAFANDO pour ses conseils et son appui sur tous les plans ;
- Je voudrais également remercier, mes promotionnaires du master AFECA pour avoir partagé des expériences, mais surtout mon intégration ;
- Enfin, je remercie ma famille et mes amis proches pour leur soutien et affection.

Tables des matières

Liste des sigles et abréviations.....	v
Liste des figures	vi
Résumé	viii
Abstract	ix
INTRODUCTION.....	1
CHAPITRE 1 : CADRE DE L'ETUDE	3
1.1. REVUE BIBLIOGRAPHIQUE	3
1.1.1. La photogrammétrie.....	3
1.1.2. La Structure from motion (SfM).....	3
1.1.3. Pix4Dmapper	4
1.1.4. Indices de végétation.....	6
1.2. DESCRIPTION DES MILIEUX D'ETUDES	7
1.2.1. Le Sénégal.....	7
1.2.1.1. Situation géographique et administrative	7
1.2.1.2. Climat et diversité des écosystèmes	8
1.2.1.3. Sols	11
1.2.2. Site d'étude (le Centre de Recherches Zootechniques de Dahra).....	12
1.2.2.1. Situation géographique et administrative	12
1.2.2.2. Historique du CRZ-Dahra	12
1.2.2.3. Occupation du sol	13
1.2.2.4. Le climat	13
1.2.2.5. La végétation	14
1.2.2.6. Les sols	14
1.2.2.7. Le site mis en défens et les tours à flux installées	14
CHAPITRE 2 : METHODOLOGIE	16
2.1. DIFFERENTES PHASES DE L'APPROCHE METHODOLOGIQUE	16
2.1.1. Une phase (1) de recherche documentaire	17
2.1.2. Une phase (2) d'essai préliminaire.....	17
2.1.3. Une phase (3) de collecte de données (sites et les stratégies de mesure).....	18
2.1.3.1. Les sites de mesures (collectes) des données	18
2.1.3.2. Stratégie de mesure.....	19
2.1.3.3. Dispositif de collecte	22
2.1.4. Phase 4 de traitement et analyse	23
2.1.4.1. Traitement des vidéos avec logiciel PIX4D	23

2.1.4.2.	Extraction des données avec logiciel QGIS	23
2.1.4.3.	Comparaisons entre mesures photogrammétriques et mesures de terrain	23
CHAPITRE 3 : RESULTATS ET DISCUSSION		24
3.1.	RESULTATS	24
3.1.1.	Images en 3D	24
3.1.2.	Analyse de toutes les données d'ensemble	25
3.1.2.1.	Poids Frais	25
3.1.2.2.	Analyse de Résidus.....	25
3.1.2.3.	Poids Sec.....	27
3.1.3.	Analyse des données au niveau temporel (Dahra 2019 et 2020).....	29
3.1.3.1.	Poids Frais	29
3.1.3.2.	Poids sec	30
3.1.4.	Analyse des données du point de vue spatial.....	31
3.1.4.1.	Poids frais	31
3.1.4.2.	Poids sec	33
3.2.	DISCUSSION	33
CONCLUSION ET PERSPECTIVES		35
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES		36
ANNEXE		39

Liste des sigles et abréviation

3D : Trois (03) dimensions

BRDF : Bidirectional Reflectance Distribution Function

CIRAD : Centre de coopération internationale en recherche agronomique pour le développement

CRZ : Centre de Recherches Zootechniques

CSE : Centre de Suivi Ecologique

FST : Faculté des Sciences et Techniques

GCP: Ground Control Points

GPS: Global Positioning System

ISRA : Institut Sénégalais de Recherches Agricoles

NDBGI indice de différence normalisé bleu vert

NDBRI indice de différence normalisé bleu rouge

NDGRI : indice de différence NDGRI normalisé vert rouge

NDVI : Normalized Difference Vegetation Index

PPZS : Pole Pastoralisme et Zones Sèches

RGB: Red-Green-Blue

RTI: Reflectance Transformation Imaging

SfM: Structure from Motion

UCAD: Université Cheikh Anta Diop

Liste des figures

Figure 1: Processus de traitement sur Pix4D	4
Figure 2: Interface du logiciel PIX4D	5
Figure 3: carte des zones éco géographiques du Sénégal, (source : CSE,2002)	8
Figure 4: Carte de la végétation du Sénégal (source : CSE,2000)	9
Figure 5: steppe dans la zone du Ferlo	10
Figure 6: forêt claire (a) et forêt galerie (b)	11
Figure 7: Localisation géographique et administrative de Dahra	12
Figure 8: Plan d'occupation du sol au CRZ de Dahra (Ndiaye, 2015)	13
Figure 9: Processus généraux de la méthodologie	16
Figure 10: Variation de la taille (a) du nombre de frames (b) et du temps de traitement (c) en fonction du nombre de division à partir d'une image vidéo.	18
Figure 11: Carte des différents sites de mesure de données au Sénégal	19
Figure 12: Réalisation d'une prise de vidéo : camera accrochée à une perche (a), palette et pot de café au tour du quadrat (b).....	20
Figure 13: prise de hauteur des individus (a), coupe à ras de sol à l'aide d'une fourche ou ciseaux des espèces herbacées dans le quadrat (b).....	21
Figure 14: Appareil Photo& Camera GoPro (1), Une Fourche (2), une paire de ciseau (3), un pot de café (4).....	21
Figure 15: Parcelle Tour à flux.....	22
Figure 16: Plan de prise des images vidéos.....	22
Figure 17: images 3D avec (a) transparent Mosaic, (b) Digital Surface Model non coloré (DSM), (c) Position caméra (d) Digital Surface Model (DSM) coloré.....	24
Figure 18: prédiction issue de la random forest en fonction du poids mesuré, Les couleurs représente les 4 jeux de données (Noir Dahra 2019, rouge Dahra 2020, Vert Nord 2020, bleu Sud 2020), la droite en pointillée représente la droite $X=Y$	25
Figure 19: distribution des résidus (mesurés – prédits) entre les 4 jeux de données. Un résidu négatif signifie une sur estimation de la prédiction alors qu'un positif signifie une sous-estimation.	26
Figure 20: distribution des résidus (mesurés – prédits) entre les 5 catégories de biomasse. Un résidu négatif signifie une sur estimation de la prédiction alors qu'un positif signifie une sous-estimation.	26

Figure 21: prédiction issue de la random forest en fonction du poids sec. Les couleurs représentent les 4 jeux de données (noir Dahra 2019, rouge Dahra 2020, vert Nord 2020, bleu Sud 2020), la droite en pointillée représente la droite $X=Y$	27
Figure 22: distribution des résidus (mesurés – prédits) entre les 4 jeux de données. Un résidu négatif signifie une sur estimation de la prédiction alors qu'un positif signifie une sous-estimation.	28
Figure 23 : distribution des résidus (mesurés – prédits) entre les 5 catégorie de biomasse. Un résidu négatif signifie une sur estimation de la prédiction alors qu'un positif signifie une sous-estimation.	28
Figure 24: prédiction issue de la random forest en fonction du poids sec sur les données, Les couleurs représente les différentes dates de collectes	29
Figure 25: Résidus en fonction des dates de collectes (la saison des pluies de 2019 correspond aux mesures C à H et celui de 2020 des mesures de N à P, la saison sèche de 2019 correspond aux mesures I à m)	30
Figure 26: prédiction issue de la random forest en fonction du poids sec sur les données de Dahra, Les couleurs représente les différentes dates de collectes	30
Figure 27: Résidus en fonction des dates de collectes	31
Figure 28: prédiction issue de la random forest en fonction du poids frais sur les données, les différents points représentent les groupes basés sur les relevés botaniques.	32
Figure 29: prédiction des résidus en fonction de la hauteur des herbacées.....	32
Figure 30: prédiction issue de la random forest en fonction du poids sec sur les données, Les point noirs représentent les différents groupes basés sur les relevés botaniques	33
Figure 31: Apparence DSM et Ortho mosaïque sur QGIS.....	39

Résumé

La végétation joue un rôle essentiel dans la vie des populations sahéliennes car elle constitue une ressource fourragère très importante pour les animaux. Elle est aussi très utilisée par les populations locales comme bois de chauffage, bois d'œuvre, dans l'alimentation et la pharmacopée. La gestion durable des ressources végétales d'une localité nécessite la connaissance de la flore pour appuyer les politiques de développement durable. Plusieurs travaux ont été menés en utilisant des outils de photogrammétrie, télédétection ou de mesures directes pour l'évaluation des caractéristiques de couverts herbacés. Cependant, ces travaux ont été principalement en zone tropicale humide et très peu en zone sahélienne. L'objectif de cette étude est d'évaluer les caractéristiques de couverts herbacés par l'utilisation de la photogrammétrie à partir d'appareils photographiques. Cette méthode repose sur une modélisation rigoureuse de la géométrie des images et de leur acquisition afin de reconstituer une copie 3D exacte de la réalité. La première étape a consisté à tester le dispositif pour déterminer le nombre d'images optimales pour une bonne reconstitution de la 3D. Cette étape a été faite à partir de vidéos obtenues au cours de la saison de pluies 2019 à Dahra. La deuxième étape a consisté à évaluer les caractéristiques de couverts herbacés de manière temporelle au cours des saisons de pluies 2019 et 2020, sur deux (02) sites (une parcelle mise en défens autour du CRZ et une autre : « la Tour à flux ».) La troisième étape quant à elle a consisté à évaluer les caractéristiques du couvert herbacés de manière spatiale (au niveau national, Nord et Sud du Sénégal) au cours des saisons des pluies 2020. Les résultats de cette étude montrent des corrélations positives entre les données du terrain et les données du modèle « Structure from motion » (SfM). En outre, les mesures sont surestimées sous l'influence du vent et sous-estimées lorsque que la hauteur des tapis herbacés est supérieure à 1m, cela explique les faibles corrélations de 37,31 % du poids sec de la phytomasse, estimée en fonction du poids sec mesuré intra zonale (Dahra et niveau national).

Mots clés : couverts herbacés, photogrammétrie, télédétection, mesures directes, d'appareil photographique, vidéos ,3D, « Structure from motion » (SfM).

Abstract

Vegetation plays an essential role in the life of Sahelian populations because it constitutes a very important forage resource for animals. It is also widely used by local populations as firewood, lumber, food and medicine. The sustainable management of plant resources in a locality requires knowledge of the flora to support sustainable development policies. Several works have been carried out using photogrammetry, remote sensing or direct measurements for the evaluation of the characteristics of herbaceous cover. However, this work has been mainly in the humid tropical zone and very little in the Sahelian zone. The objective of this study is to evaluate the characteristics of herbaceous cover by using photogrammetry from cameras. This method is based on a rigorous modeling of the geometry of the images and their acquisition in order to reconstitute an exact 3D copy of reality. The first step was to test the device to determine the optimal number of images for a good reconstruction of the 3D. This step was done using videos obtained during the 2019 rainy season in Dahra. The second step consisted of evaluating the characteristics of herbaceous cover in a temporal manner during the 2019 and 2020 rainy seasons, on two (02) sites (a parcel set aside around the CRZ and another: "the Flow Tower".) The third step consisted in evaluating the characteristics of the grass cover spatially (at the national level, North and South of Senegal) during the 2020 rainy seasons. The results of this study show positive correlations between the field data and the Structure from Motion (SfM) model data. In addition, the measurements are overestimated under the influence of wind and underestimated when the height of the herbaceous mats is greater than 1m, this explains the low correlations of 37.31% of the dry weight of the phytomass, estimated according to the dry weight measured intra zonal (Dahra and national level).

Key words: herbaceous cover, photogrammetry, remote sensing, direct measurements, camera, videos, 3D, Structure from Motion (SfM).

INTRODUCTION

Dans les pays d'Afrique subsaharienne à climat soudano-sahélien ou sahélien (moins de 800 mm de pluies annuelles), l'élevage extensif transhumant, encore appelé pastoralisme représente une des principales ressources économiques et pour les actifs agropastoraux qui représentent environ un tiers de la population rurale (Bonfiglioli, 1990). Le Sahel est une région où dominent principalement les végétations annuelles (Vries & Djitéye, 1982). Pendant la saison des pluies, l'herbe est abondante. Les paysans et les éleveurs ne se font guère de soucis pour nourrir leurs animaux, car les herbes, sont consommées par les animaux. Par contre en saison sèche, l'alimentation du bétail pose problème. Elle devient sèche et sans grande valeur nutritive. Les résidus des cultures qui devraient assurer une complémentation substantielle des animaux sont exploités à d'autres fins. Les quantités ramassées pour constituer des réserves fourragères sont très insuffisantes. Celles qui sont abandonnées sur les champs sont soit consommées trop vite par les troupeaux de transhumants, soit détruites par les feux de brousse. Vu l'importance des pâturages une évaluation de la quantité d'herbe disponible dans ces régions est un aspect clé pour la gestion du système pastoral.

Parmi les services rendus par les écosystèmes pastoraux, nous nous intéressons principalement à la biomasse fourragère. Bien que de nombreux travaux méthodologiques ont été effectués pour développer des méthodes d'évaluation de la biomasse. Ces outils peuvent être améliorés en particulier au niveau de la prise en compte de l'hétérogénéité spatiale et de la dynamique de la biomasse séché au cours de la saison sèche. Une fois, cette biomasse disponible quantifiée, nos travaux porteront sur les différents devenir de cette biomasse fourragère.

La photogrammétrie est une technique qui consiste à effectuer des mesures dans une scène, en utilisant la parallaxe obtenue entre des images acquises selon des points de vue différents. Recopiant la vision stéréoscopique humaine, elle a longtemps exploité celle-ci pour reconstituer le relief de la scène à partir de cette différence de points de vue. Cette technique repose entièrement sur une modélisation rigoureuse de la géométrie des images et de leur acquisition afin de reconstituer une copie 3D exacte de la réalité.

Cette technique analyse les images 2D prises sous différents points de vue et qui permet de recréer une image en 3D (Possoch et *al.*, 2016).

Afin de disposer d'un outil performant permettant l'évaluation de biomasse et l'identification reposant sur une analyse spatiale de la scène photographiée, un modèle « Structure from

motion » SfM est mis au point. Il permet de mieux comprendre la dynamique du tapis herbacé et les principes qui régissent sa croissance.

C'est dans ce cadre que dans cette étude, nous allons tester l'utilisation de la photogrammétrie basée sur l'utilisation de la vidéo de caméras de terrain, qui permet de recréer un modèle 3D pour les prédictions de la biomasse des pâturages sahéliens.

❖ Hypothèses et objectifs de recherche

Prédire la biomasse des herbacées ainsi que d'autres descripteurs des couverts herbacés à partir de variable de modèle 3D issus d'une vidéo d'herbe dans la généralité au cours d'une saison sur les pâturages au Sénégal.

Les hypothèses suivantes ont été formulées :

Hypothèse1 : La prédiction de la biomasse à partir d'une vidéo de l'herbe traitées via une approche « structure from motion » est possible

Hypothèse 2 : Cette prédiction est la même dans le temps et sur des couverts herbacés variés. L'objectif général de cette étude est d'évaluer la biomasse des pâturages à partir d'outils technologiques de photogrammétrie qui permettent de recréer un modèle 3D à partir des vidéos issus de caméras de terrain,

Spécifiquement, il s'agit de :

- identifier le nombre d'images optimales pour une bonne reconstitution de la 3D;
- tester l'utilisation de la vidéo pour effectuer des suivis au cours de la saison de croissance;
- tester l'utilisation de la vidéo sur une diversité de couverts herbacés représentatifs de la diversité des couverts à l'échelle nationale.

Le présent mémoire s'articule autour de trois chapitres.

Le premier chapitre est consacré à une revue bibliographique constituée de généralités sur la photogrammétrie et les indices de végétation. Le chapitre 2 décrit la méthodologie utilisée et un chapitre 3 est consacré aux résultats et discussion.

CHAPITRE 1 : CADRE DE L'ETUDE

1.1. REVUE BIBLIOGRAPHIQUE

1.1.1. La photogrammétrie

C'est une technique permettant de déterminer les dimensions et les volumes des objets à partir de mesures effectuées sur des photographies montrant les perspectives de ces objets.

Les principes de la photographie et différentes approches pour effectuer des mesures sur des photographies ont été développées. Les fondements théoriques de la photogrammétrie, notamment les principes de la perspective et de la géométrie descriptive, étaient déjà étudiés par Leonardo Da Vinci en 1480. Finalement, le développement technologique des dernières décennies, l'augmentation de la puissance des ordinateurs et le développement de la photogrammétrie analytique, ont permis le passage à la photogrammétrie numérique (Burtch, 2007).

Le choix de l'équipement doit donc être réfléchi en amont en fonction du niveau de détail et de précision autant du point de vue géométrique que colorimétrique défini par le cahier des charges. En comparaison avec la lasergrammétrie, la photogrammétrie est une technique moins coûteuse et plus polyvalente. Cependant son utilisation peut être délicate ou non adaptée en cas :

- d'objets partiellement ou entièrement composés de matériaux transparents ou réfléchissants, introduisant une incohérence due aux déplacements des points homologues.
- d'objets peu ou non texturés, car leur surface uniforme du point de vue colorimétrique empêche la détection des points homologues.
- d'objets dont la structure est lacunaire (treillis métallique) qui engendre une reconstruction très partielle à cause des nombreuses zones d'occlusions (Pamart et *al.*, 2019).

1.1.2. La Structure from motion (SfM)

Le principe de Structure from motion (SfM, « Structure acquise à partir d'un mouvement ») est une technique d'imagerie par intervalle (en) photogrammétrie destinée à estimer la structure 3D d'un objet à partir d'images 2D. Elle combine la vision par ordinateur et la vue humaine. La SfM désigne le phénomène par lequel une personne (et autres créatures vivantes) peut estimer la structure 3D d'un objet ou d'une scène en mouvement à partir de son champ de vision 2D (rétinien).

La création de modèles numériques de surface (MNS) à l'aide de la photogrammétrie permet de quantifier des changements topographiques (Lane et *al.*, 1993). Les récents développements

informatiques et dans le traitement de l'image ont permis la mise au point de nouvelles méthodes facilitant la création de modèles topographiques et d'orthophotos. La photogrammétrie digitale « Structure from Motion, (SfM) »(Smith et *al.*, 2015; Snavely et *al.*, 2008) permet la reconstruction d'orthophotos et de MNS à partir d'images de différents points de vue offrant ainsi une nouvelle possibilité pour le suivi de tout mouvement gravitaire. Parallèlement, le développement d'appareils numériques performants (ANP) et peu coûteux facilite la prise de photographies aériennes de qualité à moindres coûts.

L'acquisition des images aériennes avec un appareil photo est l'étape initiale pour la création des orthophotos et MNS. Une fois les images aériennes collectées, elles sont traitées par le logiciel de photogrammétrie SfM Pix4D et les différentes étapes sont consignés dans la figure1 ci-dessous.

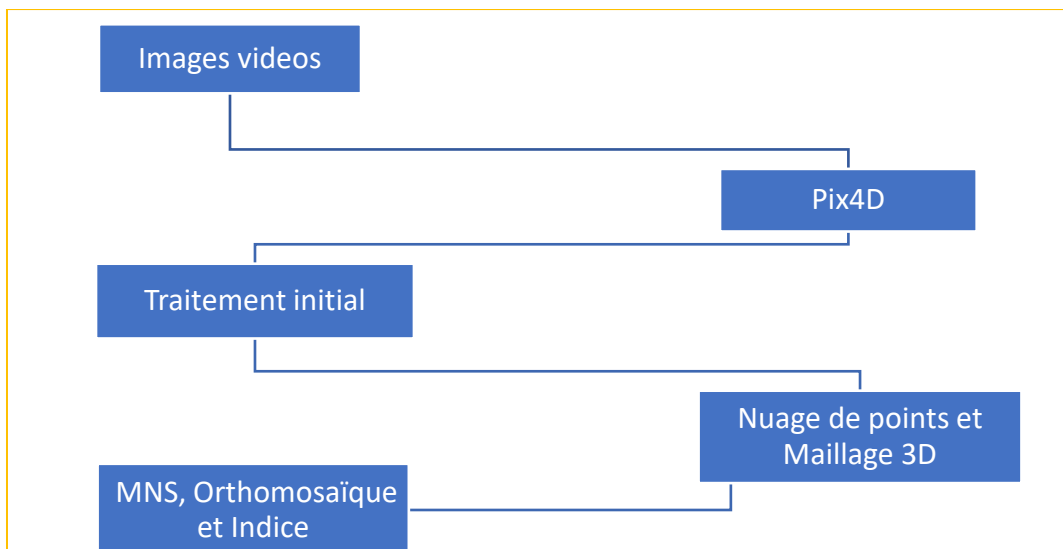


Figure 1: Processus de traitement sur Pix4D

1.1.3. Pix4Dmapper

Pix4Dmapper est un logiciel de mapping(figure2), il utilise la caméra afin de collecter les données qui seront traitées, analysées et exportées : nuage de points 3D, DSM (Digital Surface Model), calcul de volume, ligne de contour, modèles 3D texturés et thermographie.

Les cartes et données issues de Pix4Dmapper sont utilisées dans de nombreux domaines et secteurs : cadastre, environnement, exploitation minière, enquête...(Pix4Dmapper, 2019).

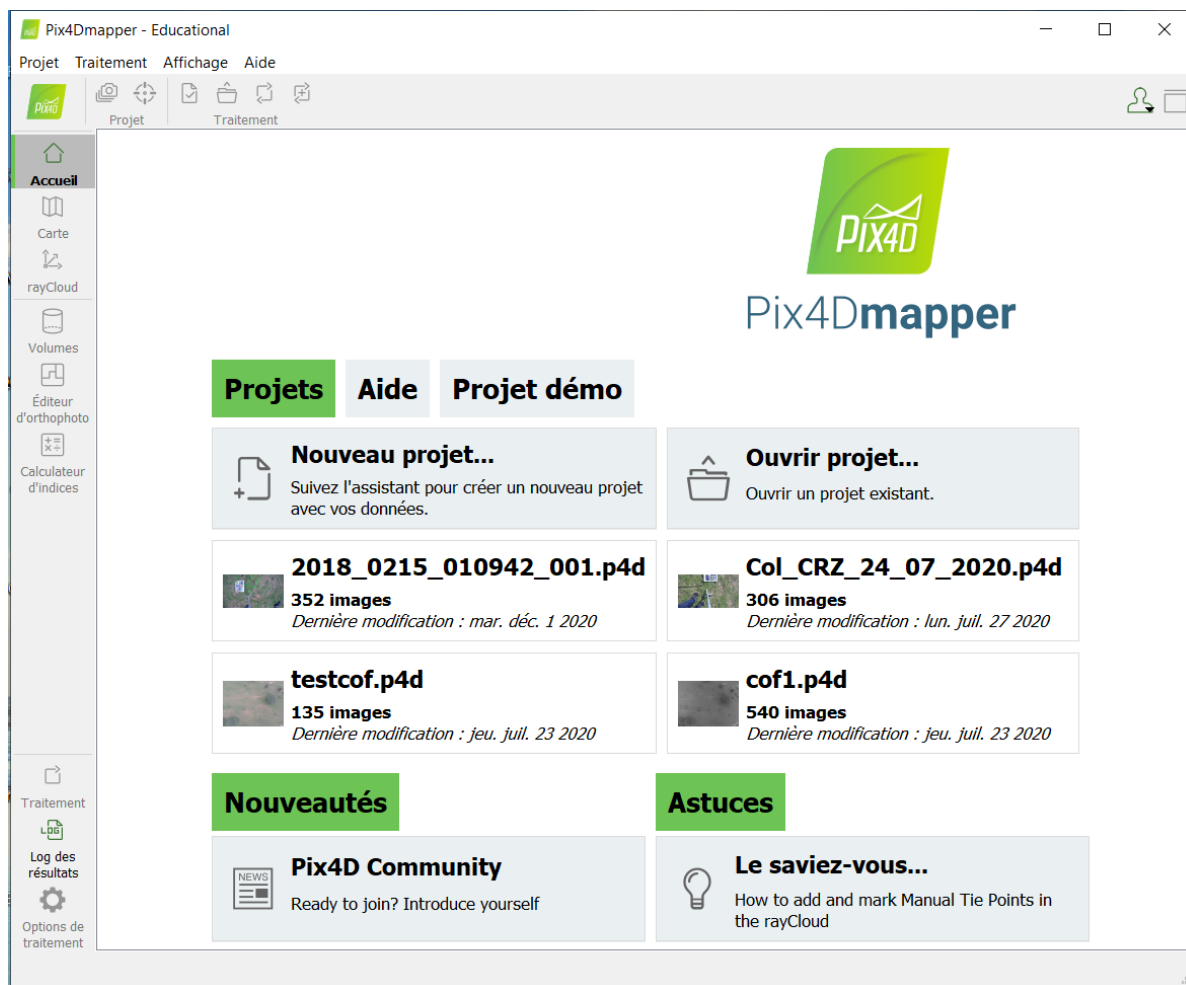


Figure 2: Interface du logiciel PIX4D

La vidéo sera coupée en différentes images (environ 300 images). Les 300 images sont ensuite utilisées dans le processus de cartographie 3D. Dans le traitement de la cartographie 3D, la première étape consiste à identifier certains points clés présents sur plusieurs images. Ainsi, une triangulation est effectuée pour évaluer la position du point clé. Ainsi, un processus de densification est réalisé par interpolation des différentes positions des points clés et ainsi produire un modèle 3D de l'objet.

❑ Étapes de traitement

Cette section décrit les trois étapes du traitement avec Pix4Dmapper.

❖ Traitement initial

Dans cette étape, les images décrits dans la section Fichiers d'entrée seront utilisées pour effectuer les tâches suivantes :

- Extraction des points caractéristiques : identifie les fonctions spécifiques comme les points caractéristiques dans chacune des images.

- Correspondance des points caractéristiques : permet de rechercher les images ayant les mêmes points caractéristiques et de les faire correspondre ensemble.
- Optimisation du modèle de caméra : permet de calibrer les paramètres internes (distance focale, ...) et externes (orientation, ...) de la caméra.

Des points d'attaches automatiques sont créés au cours de cette étape. Ces points sont la base pour les prochaines étapes de traitement.

❖ Nuage de points et Maillage 3D

Cette étape va se servir des points d'attache automatique pour :

- La Densification de points : des points d'attache supplémentaires sont créés en fonction des points d'attache automatiques, ce qui crée un nuage de points densifié.
- Maillage 3D Texturé : basé sur le nuage de points densifiés, un maillage texturé 3D peut être créé.

❖ MNS, Orthomosaïque et Indice

Cette étape permet la création de :

- Modèle Numérique de Surface (DSM) : la création du MNS permettra de calculer des Volumes, des Orthomosaïques et des Cartes de Réflectance.
- Orthomosaïque : la création de l'Orthomosaïque est basée sur l'ortho-rectification. Cette méthode supprime les distorsions de perspective des images.

1.1.4. Indices de végétation

Les indices de végétation sont des combinaisons algébriques de bandes de réflectance spectrale qui fournissent des informations utiles sur la végétation (Cherel, 2010; Srinivas *et al.*, 2004). De très nombreux indices de végétation ont été construits et utilisés depuis maintenant une quarantaine d'années (Bannari *et al.*, 1996). Ils permettent de contourner certains biais liés aux simples mesures de réflectance en multipliant l'information spectrale et peuvent être mis en relation directe avec des variables biophysiques. Il existe deux grands types d'indices, les indices en ratio et les indices de type orthogonaux (Broge & Leblanc, 2001) :

- Les indices de type ratio sont calculés indépendamment des propriétés de réflectance du sol, ils augmentent le contraste entre la végétation et le sol en minimisant les effets de la luminosité. Un des plus anciens et des plus utilisés est le « Normalized Difference Vegetation Index » (NDVI).

- Les indices de type orthogonaux prennent en compte la réflectance du sol entre le rouge et le proche infrarouge et incluent donc des coefficients spécifiques au sol. Ils sont adaptables à chaque type de terrain mais nécessitent d'estimer des facteurs propres à la composante du sol.

(UVED, 2008). Les indices de végétation sont néanmoins des indicateurs à exploiter avec précaution. S'ils peuvent être corrélés avec des variables biophysiques, la relation dépend bien souvent du stade de croissance et de la densité de végétation. Le calcul des indices s'appuie sur les écarts de réflectance constatés dans les différentes bandes spectrales tel que le RGB utilisé dans le cadre ce travail. Le tableau 1 indique les indices utilisés et leurs formules.

Table 1: liste des indices de végétation utilisés. (R : red, G : green and B : Blue).

Acronyme	Formule
NDGRI	$(R-G)/(R+G)$
NDBRI	$(B-R)/(B+R)$
NDBGI	$(B-G)/(B+G)$

1.2. DESCRIPTION DES MILIEUX D'ETUDES

1.2.1. Le Sénégal

1.2.1.1. Situation géographique et administrative

Le Sénégal se situe à l'extrême ouest du continent africain entre 12 ° 20' et 16 ° 40' de latitude Nord et 11° 20' et 17° 30' de longitude Ouest. Il est limité au Nord par la République Islamique de Mauritanie, à l'Est par la République du Mali, au Sud par la République de Guinée Conakry et la République de la Guinée Bissau et à l'Ouest par l'Océan Atlantique (Universalis, 2020).

Au plan écologique, le pays est subdivisé en six principales zones éco géographiques (figure3) que sont : la zone forestière du sud, la zone du Sénégal oriental, le bassin arachidier, la zone des Niayes, zone sylvopastorale du Ferlo et la vallée du fleuve Sénégal (figure1).

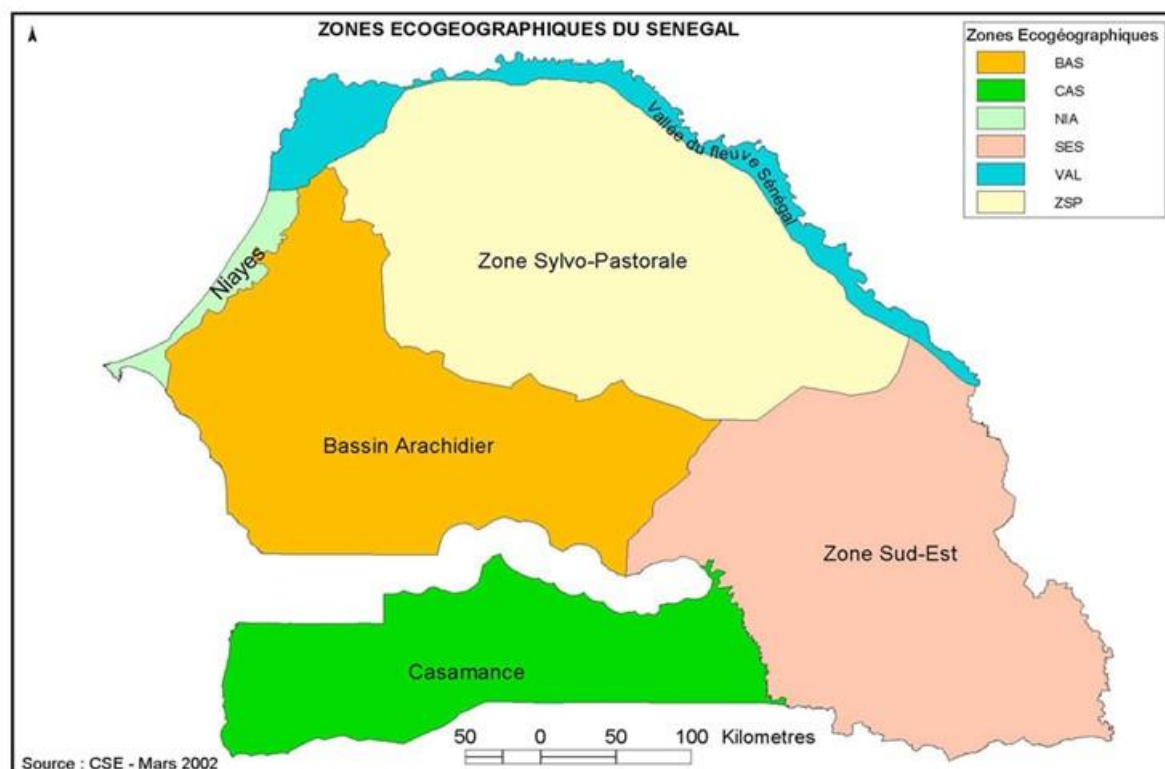


Figure 3: carte des zones éco géographiques du Sénégal, (source : CSE,2002)

1.2.1.2. Climat et diversité des écosystèmes

Sur le plan climatique, le Sénégal se situe à cheval sur le domaine sahélien au nord, soudanien au centre, et sub-guinéen au sud avec une côte maritime longue de plus de 700 km.

La pluviométrie annuelle varie entre 300 et 1200 mm (IED Afrique et PRESA, 2015). Les températures sont légèrement plus basses sur le littoral qu'à l'intérieur des terres. Effectivement, durant la saison sèche, les températures varient entre 18 et 30 °C sur le littoral et entre 24 et 30 °C à l'intérieur du pays. Durant la saison humide, les températures varient entre 25 et 30 °C sur le littoral et entre 30 et 40 °C à l'intérieur du pays (INP, 2013).

Cette situation détermine des conditions favorables à une diversification des écosystèmes et des espèces. Le pays présente quatre grands types d'écosystèmes : les écosystèmes terrestres, les écosystèmes fluviaux et lacustres, les écosystèmes marins et côtiers et des écosystèmes dits particuliers.

De par sa position en zone de transition climatique, le Sénégal présente des steppes, des savanes et des forêts qui forment souvent des mosaïques (figure 4).

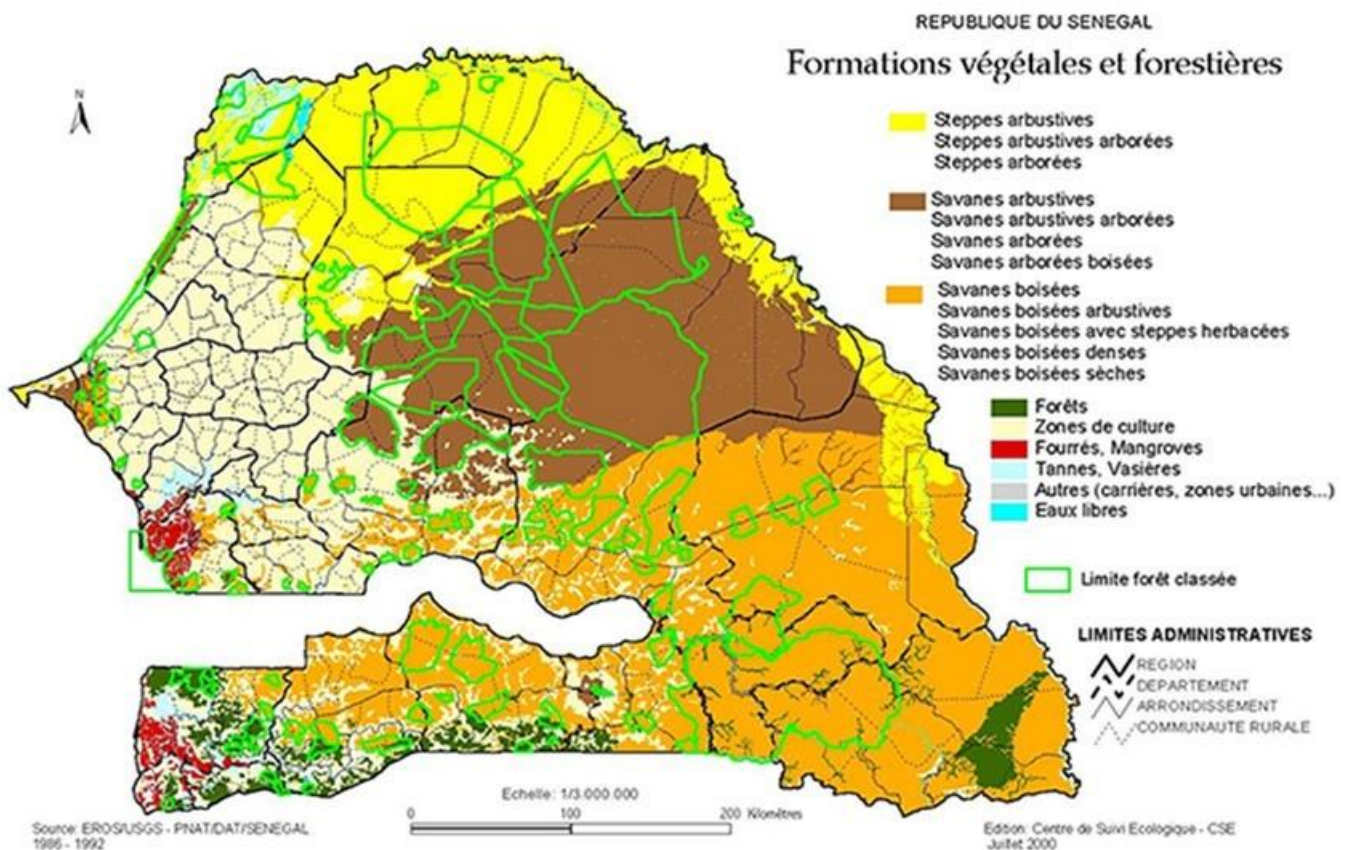


Figure 4: Carte de la végétation du Sénégal (source : CSE,2000)

A ces types de végétations s'ajoutent la végétation aquatique et des peuplements spécifiques très caractéristiques comme les mangroves, les palmeraies, les bambousaies et les gonakeraies.

- **Les steppes**

Les steppes (figure 5) couvrent le tiers nord du pays et sont constituées par un tapis herbacé plus ou moins continu dominé par *Borreria verticillata*, *Indigofera oblongifolia*, *Chloris priurii*, *Schoenofeldia gracilis* et d'autres herbacées du genre *Aristida* et *Cenchrus*. Elles sont parsemées d'espèces ligneuses épineuses comme *Acacia raddiana*, *A. senegal*, *A. seya* et *Balanites aegyptiaca* (MEDD, 2015).



Figure 5: steppe dans la zone du Ferlo

- **Les forêts**

Les forêts se rencontrent généralement dans la partie sud du pays avec des forêts claires (Figure 6a), des forêts denses sèches et des forêts galeries (Figure 6b) (Bellefontaine et *al.*, 1997). Les forêts claires localisées en Haute et Moyenne Casamance sont caractérisées par *Pterocarpus erinaceus*, *Khaya senegalensis*, *Daniellia oliveri*, *Ceiba pentandra*, *Terminalia macroptera*. Les forêts denses sèches essentiellement localisées en Basse Casamance sous forme de reliques, sont dominées par *Erythrophleum guineense*, *Detarium senegalense*, *Malacantha alnifolia*, *Parinari excelsa*, *Pentaclethra macrophylla*, *Raphia sudanica*, *Carapa procera*. Les forêts galeries occupent les vallées et sont caractérisées par des espèces telles qu'*Elaeis guineensis*, *Erythrophleum guineense*, *Khaya senegalensis*, *Carapa procera*, *Alchornea cordifolia* (Gueye, 2000).



Figure 6: forêt claire (a) et forêt galerie (b)

□ La diversité des espèces végétales

Le Sénégal présente une diversité spécifique importante avec plus de 3500 espèces végétales (MEPN, 1998). Dans ces deux règnes, les plantes à fleurs et les mammifères sont les mieux connus. Les autres groupes taxonomiques notamment les virus, les bactéries et les champignons sont peu connus.

• Les végétaux

Les algues, les mousses et les lichens constituent les groupes les moins connus. Les Pré spermaphytes sont peu représentés avec des espèces introduites du genre *Cycas*. Le groupe des plantes à fleurs est le plus connu au Sénégal. Les Dicotylédones sont représentées par 1737 espèces et les Monocotylédones par 720 espèces (MEPN et *al.*, 2010).

Les principales familles de la flore du Sénégal sont dominées par les espèces herbacées qui constituent plus de 50% de la flore. Les Graminées et les Cypéracées totalisent par exemple 473 espèces herbacées, soit plus de 18% du nombre total d'espèces de plantes à fleurs rencontrées au Sénégal. Les autres familles dominantes y compris celles de la classe des Dicotylédones sont surtout représentées par des herbacées (Hirche et *al.*, 2015).

1.2.1.3. Sols

Le Sénégal présente une grande diversité des sols résultant de l'effet combiné du climat, de la nature de la roche mère et du relief. La répartition des types d'utilisation reflète la prépondérance des sols ferrugineux tropicaux. Sablonneux et secs au Nord du pays, les sols sont ferrugineux dans les régions centrales et latéritiques dans le sud. Ils présentent une faible aptitude culturale à cause de leur pauvreté d'une part et des phénomènes de dégradation qu'ils connaissent d'autre part (érosion éolienne et hydrique, salinisation, acidification).

1.2.2. Site d'étude (le Centre de Recherches Zootechniques de Dahra)

1.2.2.1. Situation géographique et administrative

Le centre de Recherches Zootechniques (CRZ) de Dahra, dans la zone sylvopastorale du Ferlo, se situe au Nord du Sénégal (figure 7). Il a été créé en 1950, et est situé approximativement à 15°21 de latitude Nord et à 15°28 de longitude Ouest. La commune de Dahra fait partie du département de Linguère. Le CRZ de Dahra forme une concession de 6800 ha divisée en deux parties juxtaposées, et est géré par l'Institut Sénégalais de Recherches Agricole (ISRA). La petite concession de 900 ha abrite tous les bâtiments techniques, administratifs et les logements du personnel. La grande concession de 5900 ha comprend les terres destinées aux parcours des animaux et pour d'autres activités sylvopastorales (parcelles de production de semences, de recherches sur les essences forestières etc.)(Ndiaye, 2015).

Le CRZ de Dahra se retrouve ainsi dans le Sahel sénégalais en zone sylvopastorale. Ce centre est situé à la limite Sud du Ferlo-sableux (Cornet & Rambal, 1981)

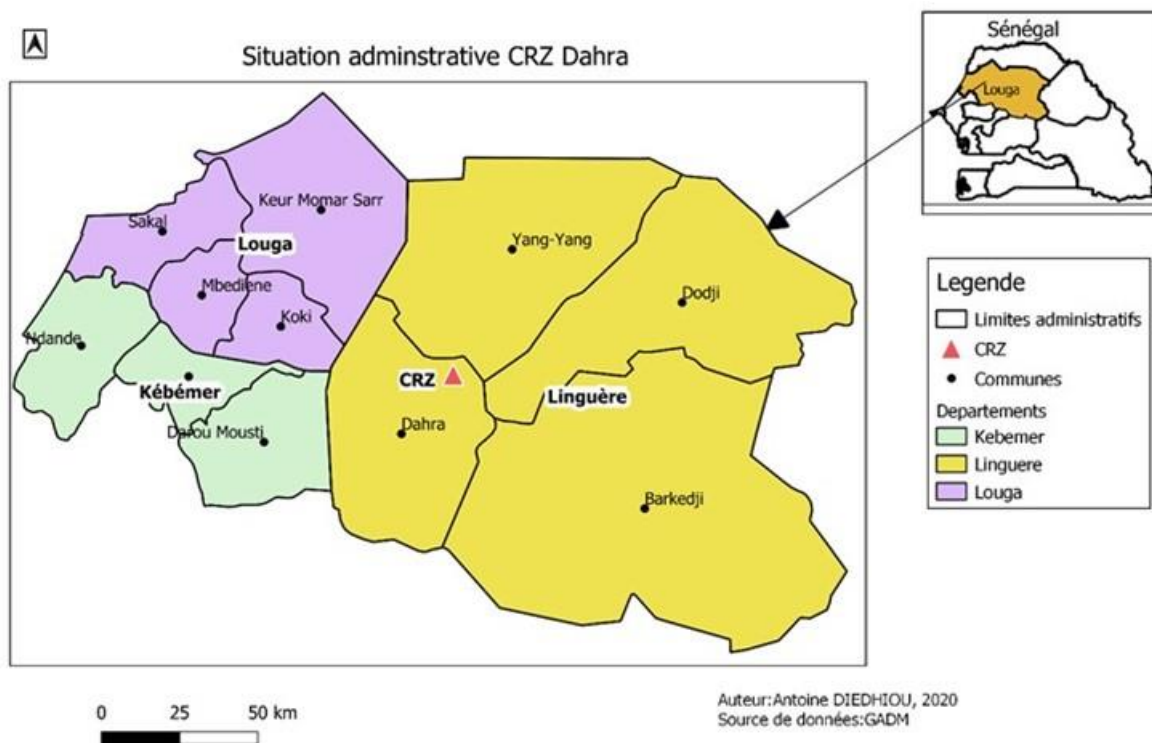


Figure 7: Localisation géographique et administrative de Dahra

1.2.2.2. Historique du CRZ-Dahra

Le CRZ est créé en 1950 et était constituait jusqu'au début des années 90 de la zone de pâturage extensif comprenant 19 parcelles (Sow et al., 1988). Son périmètre est de 42 kilomètres (Ndiaye, 2015). Son objectif de départ fut l'amélioration de la race de cheval local et les études

sur les bovins ont commencé vers 1952. Vers 1960 débutent les études sur les petits ruminants. Actuellement l'objectif est d'améliorer la production de viande et de lait en zone sylvopastorale.

1.2.2.3. Occupation du sol

L'élevage extensif constitue donc le principal mode d'exploitation de l'espace (figure 8). Celui-ci est associé à des activités agricoles et de sylviculture en partenariat avec certains centres de l'ISRA, l'association militaire et la population locale, permettant ainsi la sécurisation d'une partie du domaine (Ndiaye, 2015).

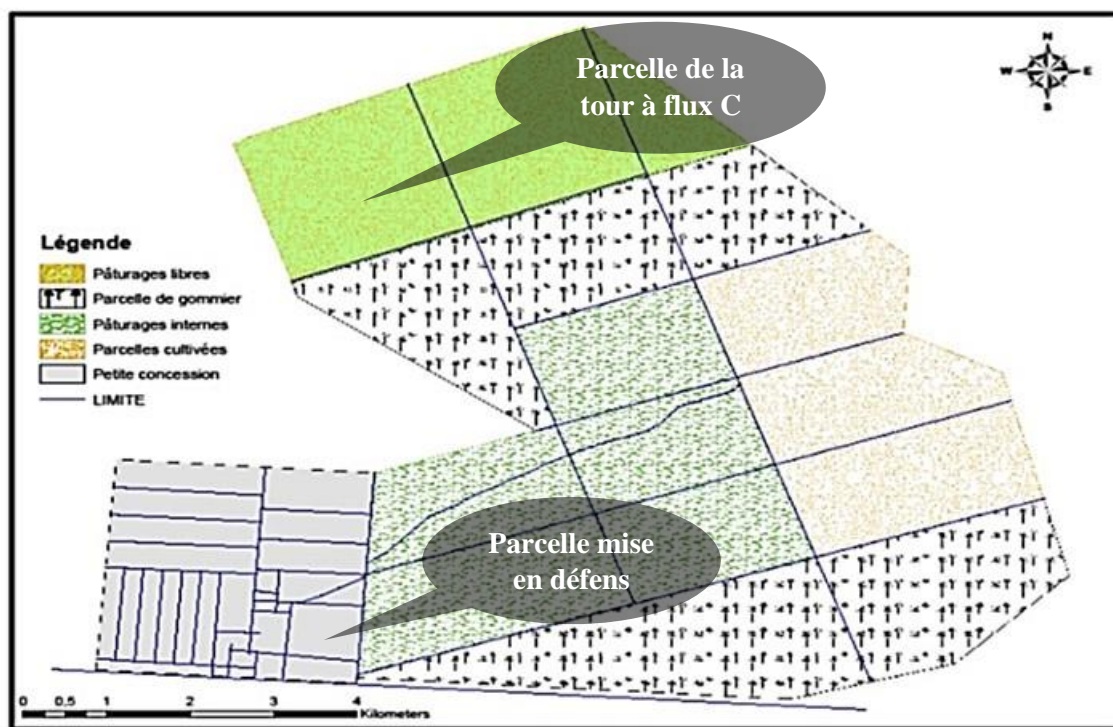


Figure 8: Plan d'occupation du sol au CRZ de Dahra (Ndiaye, 2015)

1.2.2.4. Le climat

Le Ferlo représente la partie la plus aride et la plus chaude du Sahel sénégalais avec un climat de type tropical de mousson, semi-aride, monomodal à variante très chaude (Assouma, 2016). Le CRZ de Dahra présente une pluviométrie moyenne de 371,67 mm sur une période de 50 ans (1964 à 2013). Cette pluviométrie s'étend entre fin juin et début octobre avec un cumul moyen mensuel de 35,95 mm (sur 50 ans). Elle présente de très fortes irrégularités dans la répartition et une grande variabilité quantitative d'une année à l'autre. De plus, la température varie tout au long de l'année avec une moyenne de $29,81 \pm 2,17$ °C, un maximum de $41,06 \pm 0,72$ °C au mois de mai et un minimum de $18,84 \pm 0,84$ °C en janvier. Par ailleurs, l'humidité relative

moyenne est de $43,75 \pm 17,02$ %, le vent souffle en moyenne avec une vitesse de $1,45 \pm 0,25$ m/s; et l'insolation moyenne est de $8,24 \pm 0,93$ heures/jour (Ndiaye, 2015).

1.2.2.5. La végétation

La végétation du centre est très liée au type de sol et à la pluviosité (Ndiaye, 2015). Ainsi, on observe :

- sur dune de sable, le tapis herbacé est abondant et se compose principalement de graminées annuelles, la strate ligneuse y est peu développée avec une prédominance des espèces telles que (*Combretum glutinosum*, *Balanites aegyptiaca*, *Dichrostachys glomerata*, *Boscia senegalensis*, *Guiera senegalensis*, et *Commiphora africana*) ;
- dans les dépressions, le peuplement ligneux est dense. La végétation herbacée est surtout représentée par des graminées pérennes telle que (*Andropogon gayanus*, *Aristida sieberiana*, *Aristida stipoides*, *Eragrostis tremula*, etc).

1.2.2.6. Les sols

Les sols de la station peuvent être regroupés en trois grands ensembles pédologiques selon leurs propriétés physiques et chimiques (Casenave & Valentin, 1989) :

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

1.2.2.7. Le site mis en défens et les tours à flux installées

Le projet « Dynamique de la diversité végétale durant la saison des pluies » est issu d'une collaboration avec l'université de Copenhague dans le cadre du dispositif de tours à flux issu de la collaboration entre multiples partenaires sur le CRZ de Dahra. L'objectif est de continuer les mesures effectuées au niveau de la tour à flux de la biomasse herbacée produite tous les 10 jours des saisons des pluies au niveau de la parcelle de la tour à Flux, (Ndiaye, 2019). Le site expérimental est installé au Nord du centre dans sa partie pâturée à 6 kilomètres de la petite concession. C'est une parcelle de 750 x 750 mètres divisée en 9 sous parcelles dont la centrale abrite deux tours à flux. Deux transects perpendiculaires (au centre du site) de 1000 mètres de long comptant chacun 14 points de mesure de la phytomasse herbacée y sont installés. Ces points sont distants de 120 mètres à l'extérieur du sous carré central et de 50 mètres à l'intérieur de celui-ci, de sorte que sur chaque transect, 8 des 14 points de mesure se retrouvent dans le

sous carré central. Ces écartements entre les points de mesure ont permis d'avoir plus de points à mesurer à proximité des tours à flux afin d'avoir suffisamment de mesures.

Cette parcelle expérimentale est installée et gérée par une équipe de chercheurs de l'université de Copenhague depuis 2001 en collaboration avec le CRZ de Dahra.

CHAPITRE 2 : METHODOLOGIE

2.1. DIFFERENTES PHASES DE L'APPROCHE METHODOLOGIQUE

Ce travail est réalisé au Centre de Recherches Zootechniques (CRZ) de Dahra et au niveau national (Sénégal) sur une durée de six (6) mois.

Il repose sur quatre (4) phases représentées dans le schéma ci-dessous :

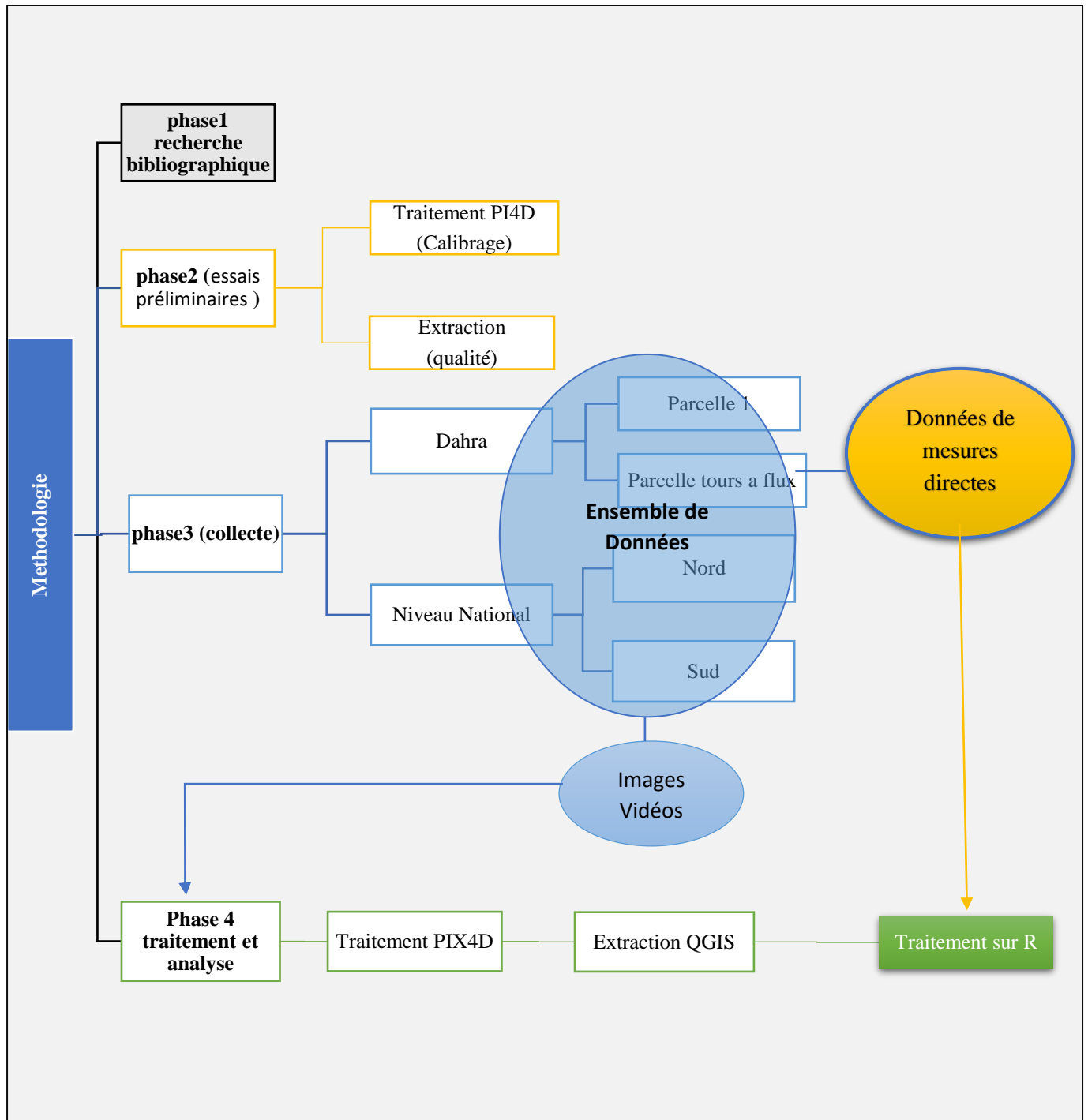


Figure 9: Processus généraux de la méthodologie

- Une phase (1) de recherche documentaire (5 mois) ;
- Une phase (2) de d'essais préliminaires (15 jours) ;
- Une phase (3) de collecte des données (sites et les stratégies de mesure, durant 4 mois) ;
- Une phase (4) analyse et traitement des données (3 mois).

2.1.1. Une phase (1) de recherche documentaire

La recherche documentaire a permis de collecter des données informatives grâce à l'étude de documents officiels ou universitaires.

Elle a permis d'obtenir des informations utiles pour développer ses connaissances sur le sujet.

Les documents type :

- Les thèses et les mémoires d'autres étudiants ;
- Les périodiques spécialisés ;
- Les documents statistiques ;
- Les documents officiels ;
- Les documents numériques (Interne).

2.1.2. Une phase (2) d'essai préliminaire

À partir des données vidéos recueillies au cours des saisons (sèche et humide) 2019 au CRZ de Dahra, un certain nombre de procédures de calibrage préliminaires ont été mises en œuvre pour chacune des vidéos. Cela comprenait : la taille, le nombre de frames, le temps de calcul, la largeur, la longueur, la résolution des images et le pourcentage d'optimisation (Dataset).

Le traitement est effectué à partir des identificateurs de qualité des images, comme : la taille, le nombre de frames, le temps de calcul. Dans le cadre d'un ensemble de mécanismes qui visent à assurer une qualité optimale de l'image obtenue après traitement. Les critères qui sont utilisés pour déterminer le seuil optimal ont permis d'obtenir la figure11 ci-après.

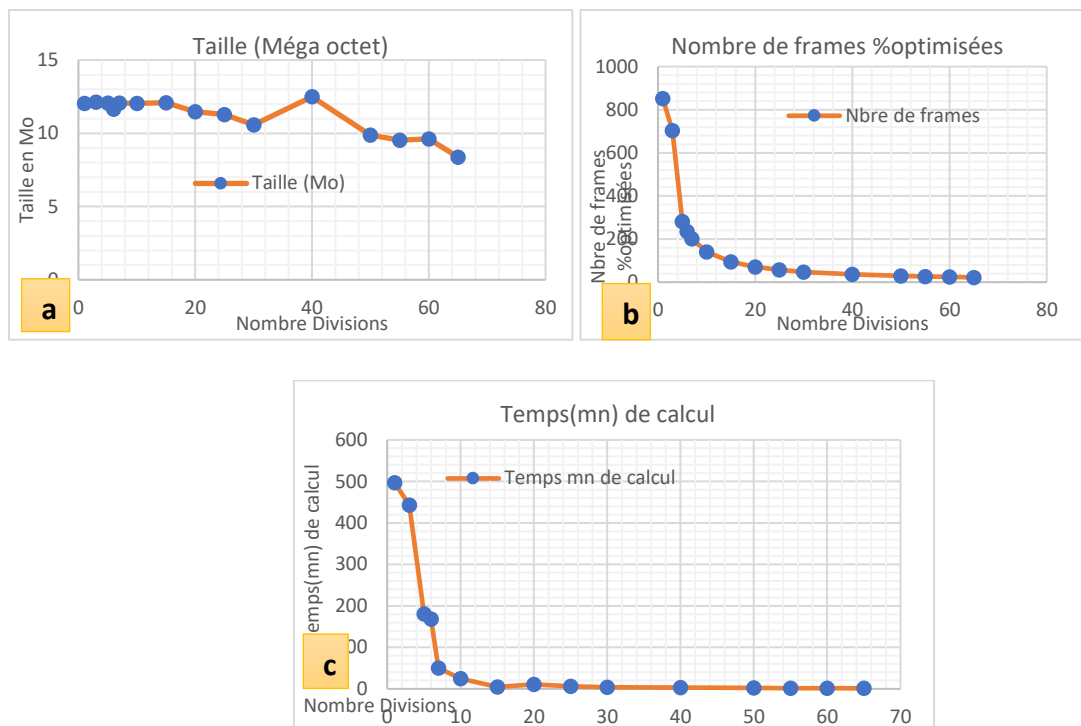


Figure 10: Variation de la taille (a) du nombre de frames (b) et du temps de traitement (c) en fonction du nombre de division à partir d'une image vidéo.

Après une lecture des images en fonction de la qualité visuelle et données numériques, le nombre de divisions optimales pour une bonne qualité de l'image en 3D est de (276- 380) images « calibrated » au-dessus de celui-ci le temps de création de l'image est très élevé et en dessous de ce seuil la qualité est altérée.

2.1.3. Une phase (3) de collecte de données (sites et les stratégies de mesure)

2.1.3.1. Les sites de mesures (collectes) des données

Ces différentes mesures sont réalisées sur deux types de site au niveau national et au CRZ de Dahra.

2.1.3.1.1. Au niveau national

Deux missions de collecte sont réalisées pour la prise en compte de la variabilité pédoclimatique dans l'estimation de la biomasse.

Les différents sites de prise de mesure sont représentés dans la (figure11) dont :

- Une mission dans le Ferlo (Nord du Sénégal) ;
- Une mission dans le sud Sénégal.

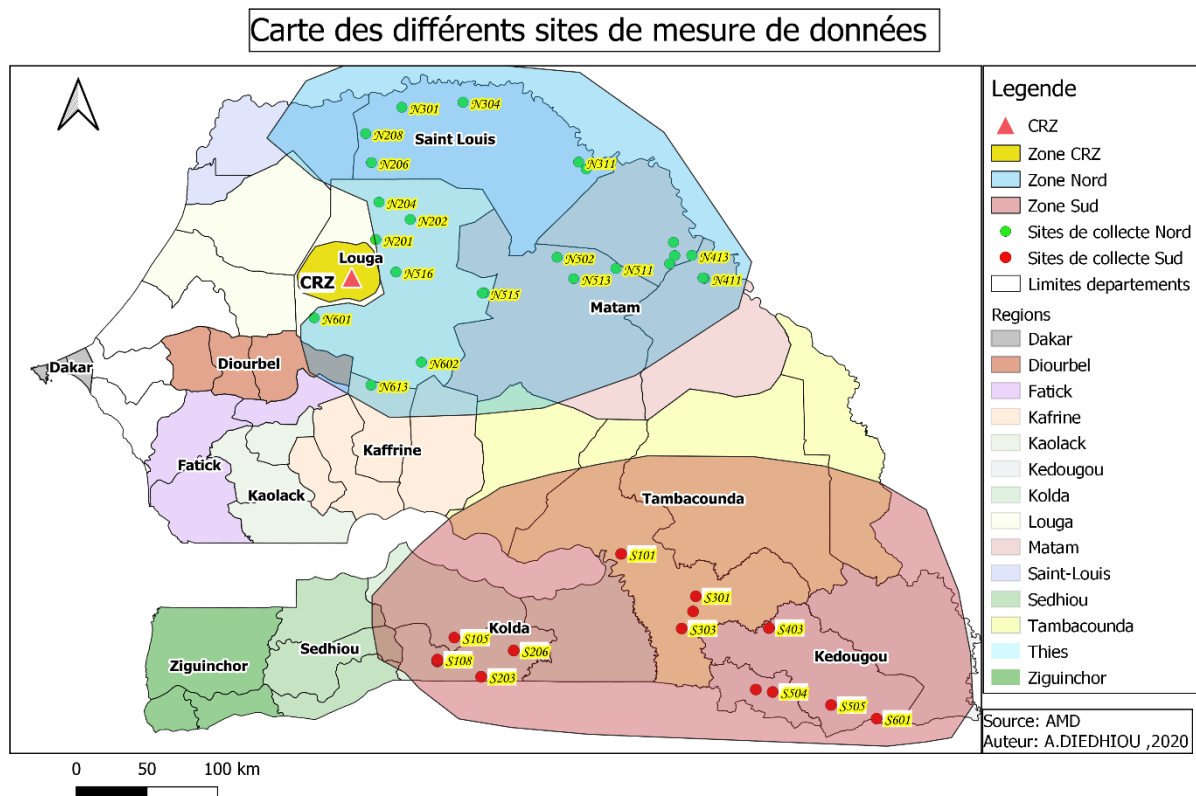


Figure 11: Carte des différents sites de mesure de données au Sénégal

2.1.3.1.2. Au niveau du CRZ

Des mesures effectuées au cours de la saison des pluies sur deux parcelles (parcelle de la tour à flux décrite plus haut et une autre parcelle à proximité du CRZ) afin de voir si la mesure par vidéo peut permettre de faire des suivis en cours de saisons au niveau de Dahra.

2.1.3.2. Stratégie de mesure

Elle a reposé sur des données produites au cours de la saison des pluies de 2019 au CRZ de Dahra pendant laquelle des données ont été collectées tous les dix jours. Ces données sont complétées par d'autres collectées au cours de la saison des pluies 2020 au niveau du CRZ et au niveau national.

2.1.3.2.1. Par la camera

Une captation vidéo de l'herbe verticalement au sol à environ un mètre du sol, est réalisée sur chaque quadrat en fer de 1m² en suivant cinq (5) lignes pour couvrir tout le carré avec la caméra de type Campark X20 Caméra Sport 4K Ultra HD 20 MP Grand-Angle accrochée à une perche (figure 12a).

Une référence colorimétrique et deux pots de peintures (de dimensions connues) ont été aussi disposée au sol à côté de ce dernier pour calibrer la hauteur de l'herbe dans le quadrat et faire

d'éventuelles corrections de couleur pendant l'analyse. Après l'installation, une vidéo est réalisée avec l'appareil photo sur le quadrat (figure 12b).

Par ailleurs, l'herbe est enlevée autour du quadrat sur une distance d'environ 10 cm pour bien délimiter le quadra et faire apparaître le niveau du sol.



Figure 12: Réalisation d'une prise de vidéo : camera accrochée à une perche (a), palette et pot de café au tour du quadrat (b).

2.1.3.2.2. Mesure directe sur les herbacées

Après la captation vidéo sur les quatre quadrats, des mesures s'effectuent :

- Des données de biomasse herbacée sont collectées pendant la saison des pluies. La technique de collecte utilisée est celle de placette temporaire. Les placettes temporaires sont des placettes à usage unique car elles ne sont pas matérialisées sur le terrain (Picard *et al.*, 2010). Ce sont des placettes mesurées une seule fois qui caractérisent des peuplements différents à un instant donné, sans prendre en considération la cinétique de croissance (Thiombiano *et al.*, 2016). L'estimation de la biomasse herbacée a été effectuée par coupe à ras de sol à l'aide d'une fourche ou ciseaux des espèces herbacées dans le quadrat de 1m² délimité par un cadre métallique (figure14).
- Des recouvrements en fonction des différents stades phénologiques (germination/ feuillaison/ floraison/ sénescence) au niveau de Dahra ;
- Des estimés de la diversité spécifique ;
- Des hauteurs de 10 individus dans chaque quadrat à Dahra et 5 individus au niveau national prises avec un mètre ruban (figure13).



Figure 13: prise de hauteur des individus (a), coupe à ras de sol à l'aide d'une fourche ou ciseaux des espèces herbacées dans le quadrat (b).

Lorsqu'une nouvelle espèce inconnue est rencontrée elle est collectée en herbier

- De la Phytomasse fraîche (sur le terrain) et sèche (après passage à l'étuve)

le but de cette opération est d'obtenir une masse sèche des échantillons et donc la teneur en matière sèche.



Figure 14: Appareil Photo& Camera GoPro (1), Une Fourche (2), une paire de ciseau (3), un pot de café (4)

2.1.3.3. Dispositif de collecte

❑ Au CRZ (Parcelle1 2019 et Parcelle2 tours à flux 2020)

Tous les dix jours sont collectés des données :

En considérant les 28 quadrats du protocole mis en place par l'université de Copenhague de la figure 15 (thèse O. Diatta), 4 quadrats parmi les 28 sont choisis pour y réaliser des vidéos.

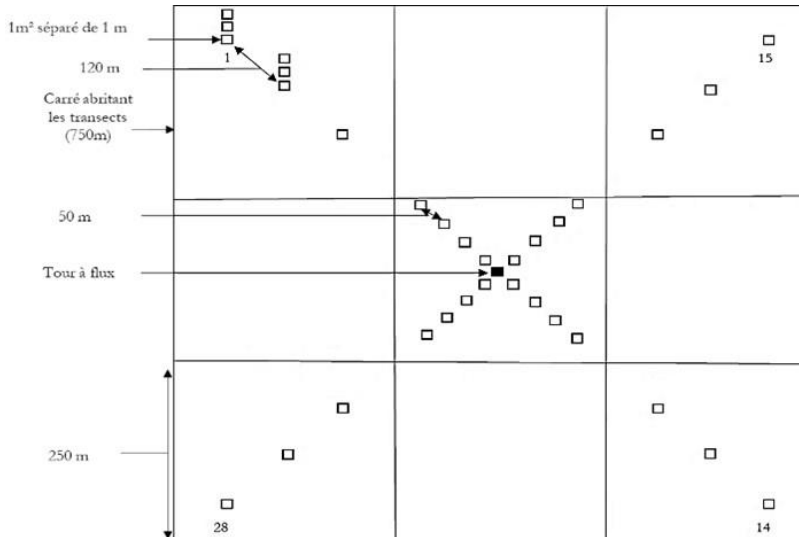


Figure 15: Parcelle Tour à flux

❑ Au niveau national

Installer 3 quadrats.

Pour chaque site visité est effectué une description type de végétation (savane, steppe, taux de couverture estimée, état du couvert, sol) et des mesures de hauteur des individus pris de façon aléatoire.

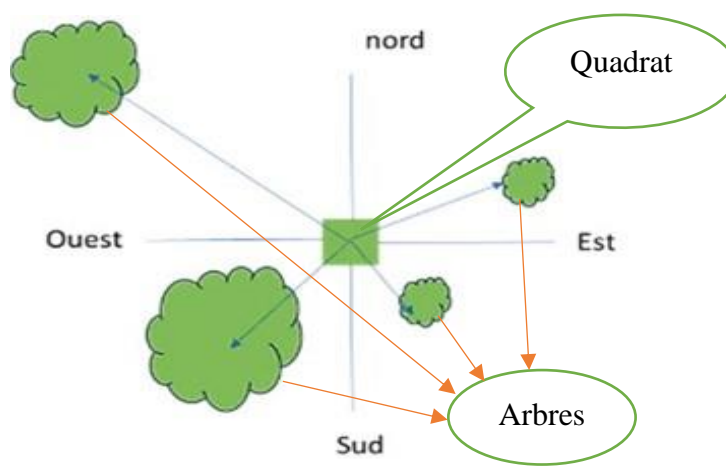


Figure 16: Plan de prise des images vidéos

2.1.4. Phase 4 de traitement et analyse

2.1.4.1. Traitement des vidéos avec logiciel PIX4D

Dans cette partie sont traitées les vidéos qui sont recueillies de la captation de l'herbe verticalement au sol à environ un mètre du sol (mesure de terrain).

Chaque vidéo obtenue est traitée à l'aide du logiciel PIX4D qui transforme les images vidéo réalisées en modèles 3D. Cependant, le pot de café de 20 cm présent dans le dispositif est utilisé comme référentiel pour les mesures de hauteurs.

2.1.4.2. Extraction des données avec logiciel QGIS

Les valeurs rouges, bleu et vert sont extraites et le calcul des indices de différence normalisée entre deux couleurs (indice de différence NDGRI normalisé vert rouge avec la formule : $(R-G)/(R+G)$; indice de différence NDBRI normalisé bleu rouge avec la formule $(B-R)/(B+R)$, indice de différence NDBGI normalisé bleu vert) avec la formule $(B-G)/(B+G)$ est effectué. Une régression partielle du moindre carré entre les différentes variables obtenues à partir de la vidéo (volume, trois couleurs et trois indices de différence normalisés) est réalisée.

2.1.4.3. Comparaisons entre mesures photogrammétriques et mesures de terrain

Après extraction des mesures géométriques par photogrammétrie, une base de données est créée avec les deux séries de données (mesures de terrain et mesures photogrammétriques).

Une analyse en forêt de Breiman (forêt aléatoire) a été effectuée avec les trois indices colorés ainsi que la hauteur moyenne et maximum du quadrat en utilisant le package (randomForest). Une analyse globale ainsi que des analyses pour les données temporelles (Dahra) et la donnée spatiale ont été réalisées.

Les résidus (différence entre la prédiction et la valeur de terrain) ont ensuite été analysés en fonction du jeu de données, la hauteur de l'herbe et la biomasse mesurée.

CHAPITRE 3 : RESULTATS ET DISCUSSION

3.1.RESULTATS

3.1.1. Images en 3D

Le traitement des images videos a permis de réaliser des structure SfM 3D telles que : l'orthophotographie et le modèle numérique de surface (MNS).

Le traitement est fait avec le logiciel Pix4D de la vidéo de l'appareil photographique (la vidéo en a été découpé en fraction d'image avant le traitement). Il est automatique et se fait en trois étapes :

- l'initialisation : elle a permis d'obtenir la figure 17c qui montre les différentes positions de la caméra lors de la prise de vue,
- la densification : durant cette phase est obtenu la figure 17d
- la création des modèles : cette phase a permis d'obtenir les figures 17a et 17b .

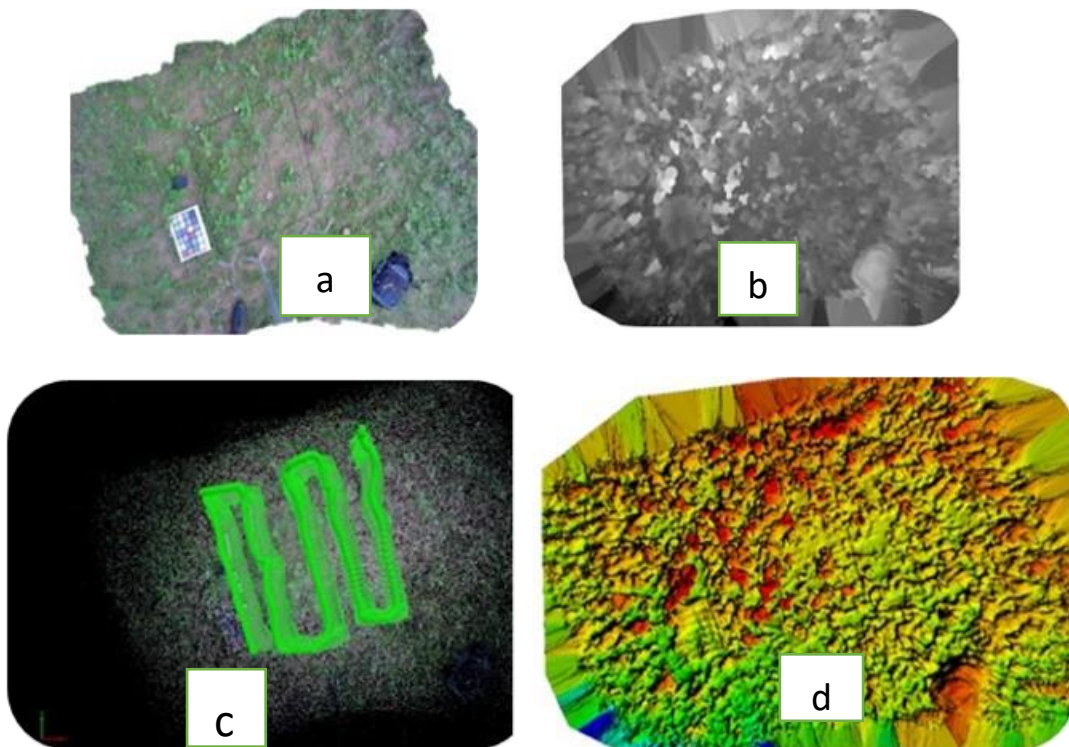


Figure 17: images 3D avec (a) transparent Mosaic, (b) Digital Surface Model non coloré (DSM), (c) Position caméra (d) Digital Surface Model (DSM) coloré.

3.1.2. Analyse de toutes les données d'ensemble

3.1.2.1. Poids Frais

La figure 18 montre la prédiction du poids frais en fonction du poids frais mesuré sur les 4 jeux de données (Noir Dahra 2019, rouge Dahra 2020, Vert Nord 2020, bleu Sud 2020),

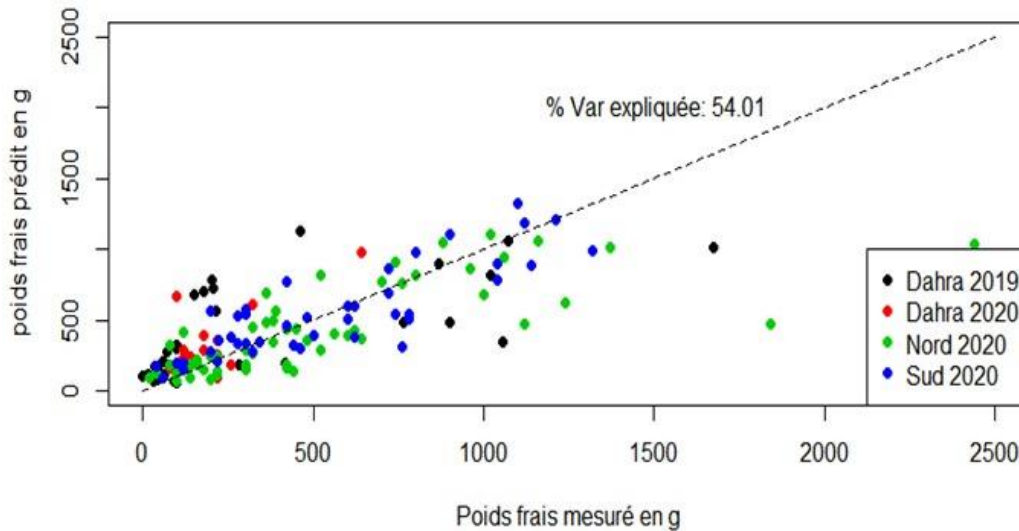


Figure 18: prédiction issue de la random forest en fonction du poids mesuré, Les couleurs représentent les 4 jeux de données (Noir Dahra 2019, rouge Dahra 2020, Vert Nord 2020, bleu Sud 2020), la droite en pointillée représente la droite X=Y

Le modèle ainsi développé pour ces 4 jeux de données explique 54.01% de variance du poids de biomasse fraîche par les données issues de la vidéo avec une erreur quadratique moyenne de 5%. Nous avons trouvé une corrélation élevée à plus de 50% entre le poids frais estimé et celui mesuré.

3.1.2.2. Analyse de Résidus

La figure 19 montre la distribution des résidus (mesurés – prédits) entre les 4 jeux de données (Dahra en (2019-2020) et du Nord -Sur (2020)) et la figure 20 montre distribution des résidus (mesurés – prédits) entre les 5 catégories de biomasse.

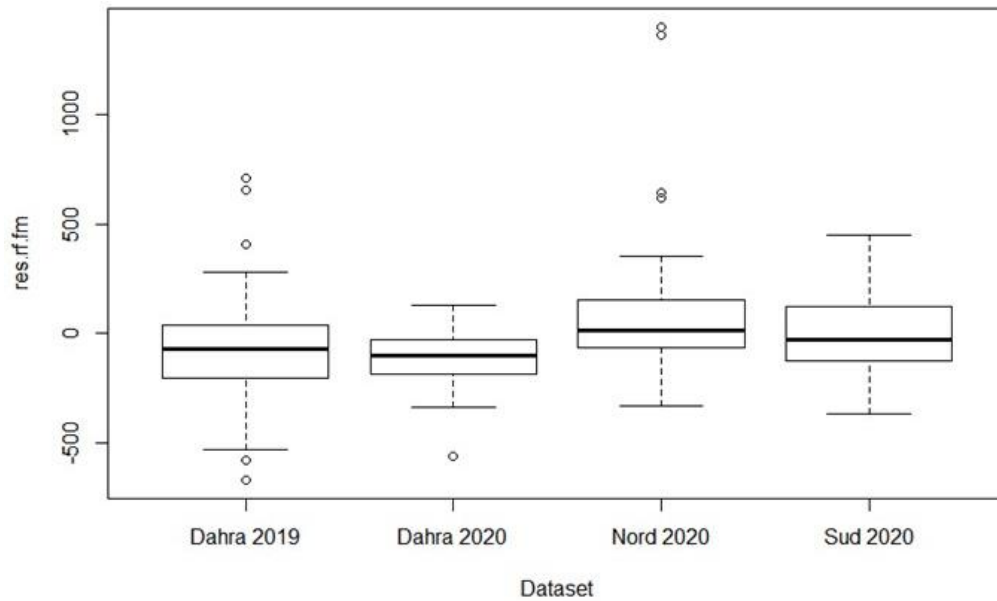


Figure 19: distribution des résidus (mesurés – prédits) entre les 4 jeux de données. Un résidu négatif signifie une sur estimation de la prédiction alors qu'un positif signifie une sous-estimation.

Trois phases se distinguent dans la distribution des résidus entre les 4 jeux de données de Dahra en (2019-2020), du Nord et Sud (2020).

L'analyse de cette figure montre que les résidus à Dahra 2019 ont tendance à être surestimé et au Nord 2020 à être sous-estimé tandis que celles de Dahra 2020 et Sud 2020 ont une distribution plus ou moins normale.

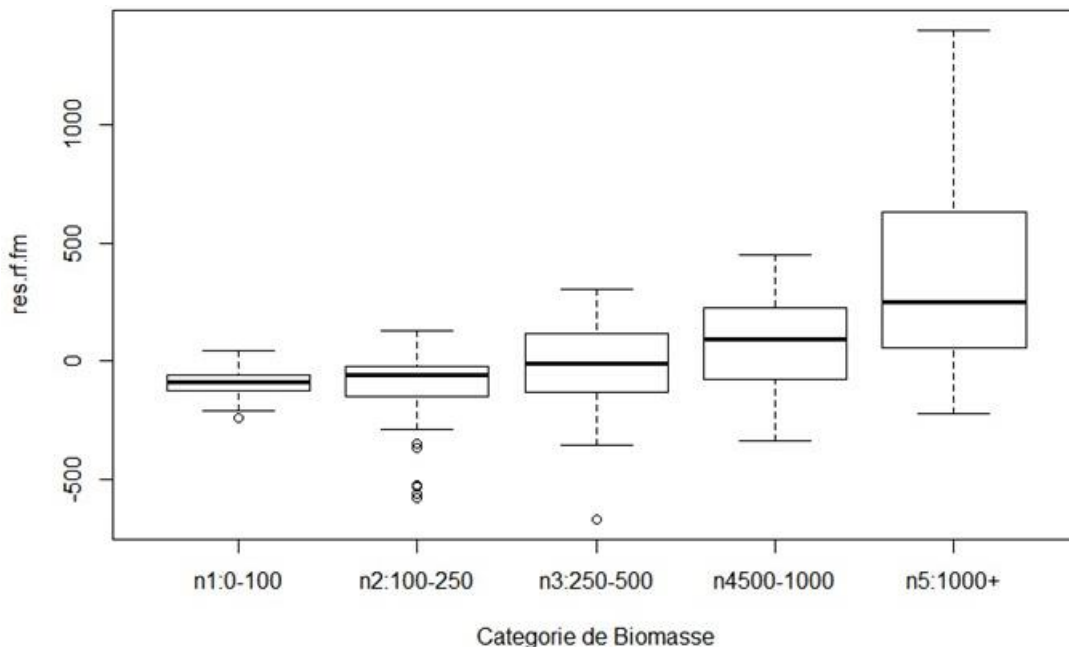


Figure 20: distribution des résidus (mesurés – prédits) entre les 5 catégories de biomasse. Un résidu négatif signifie une sur estimation de la prédiction alors qu'un positif signifie une sous-estimation.

Le graphique de la distribution des résidus (mesurés – prédits) entre les 5 catégories de biomasse de la figure ci-dessus montre que la biomasse a tendance à être surestimé entre les catégories n1, n2 et n3, par compte pour les catégories n4 et n5 la distribution tend vers zéro donc une distribution normale

3.1.2.3. Poids Sec

La figure 21 montre une prédiction issue de la random forest en fonction du poids sec, des zones (noir Dahra 2019, rouge Dahra 2020, vert Nord 2020, bleu Sud 2020).

La figure 22 distribution des résidus (mesurés – prédits) entre les 4 jeux de données.

La figure 23 montre la distribution des résidus (mesurés – prédits) entre les 5 catégorie de poids de biomasse qui vont de la catégorie n1 (0- 100), n2 (100-250), n3 (250-500), n4 (500-1000) et n5 de 1000+.

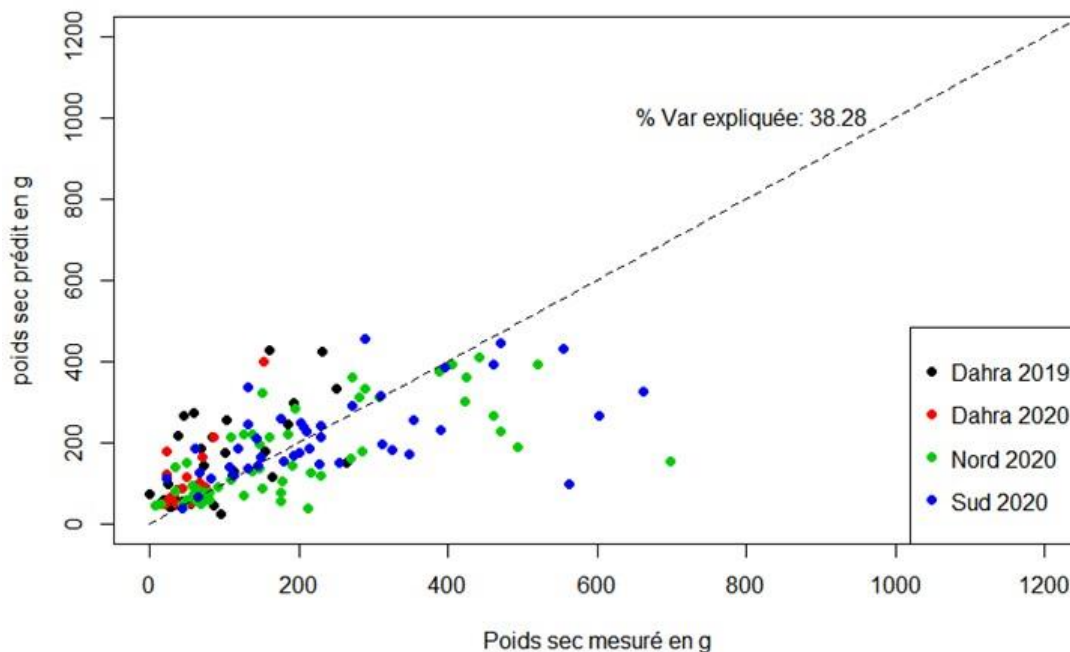


Figure 21: prédiction issue de la random forest en fonction du poids sec. Les couleurs représentent les 4 jeux de données (noir Dahra 2019, rouge Dahra 2020, vert Nord 2020, bleu Sud 2020), la droite en pointillée représente la droite X=Y

Il ressort de cette prédiction issue de la random forest en fonction du poids sec (les couleurs représentent les 4 jeux de données : Noir Dahra 2019, rouge Dahra 2020, Vert Nord 2020, bleu Sud 2020) que la variation du poids sec prédit est de 38,28% en fonction du poids sec mesuré. Toutefois, les poids prédits au Nord 2020 et au Sud 2020 montrent une plus grande variance.

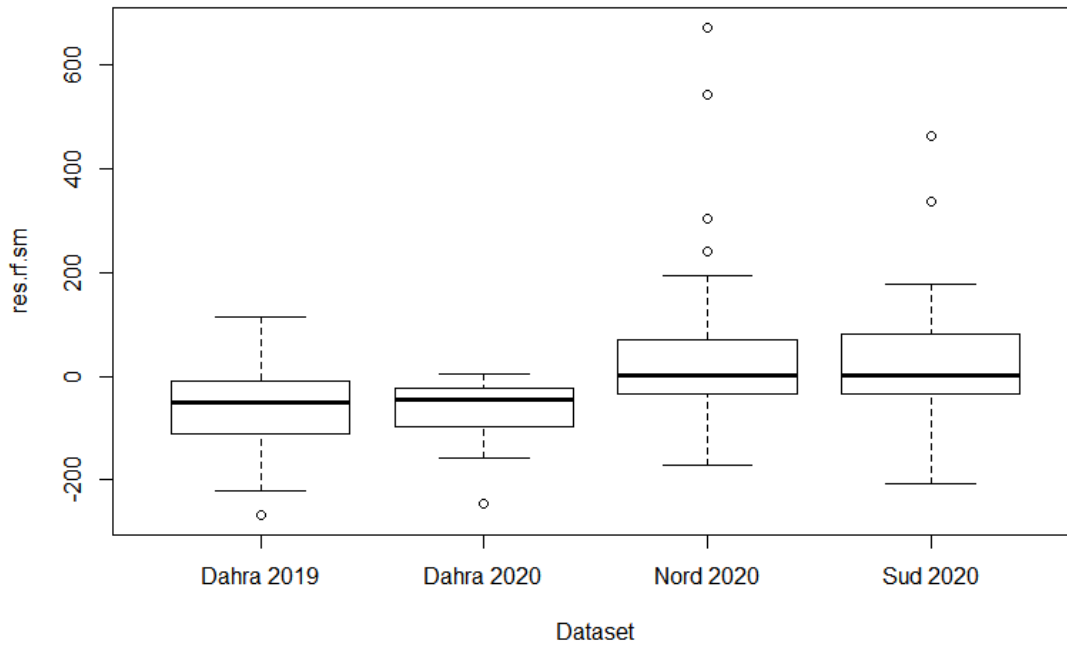


Figure 22: distribution des résidus (mesurés – prédits) entre les 4 jeux de données. Un résidu négatif signifie une sur estimation de la prédiction alors qu’un positif signifie une sous-estimation.

Le test de comparaison de la distribution des résidus (mesurés – prédits) entre les catégories de biomasses de la figure22 ci-dessus montre que les résidus ont tendance à être surestimé à Dahra en 2019 et 2020 par contre pour la catégorie Nord 2020 et Sud 2020 les résidus sont surestimés.

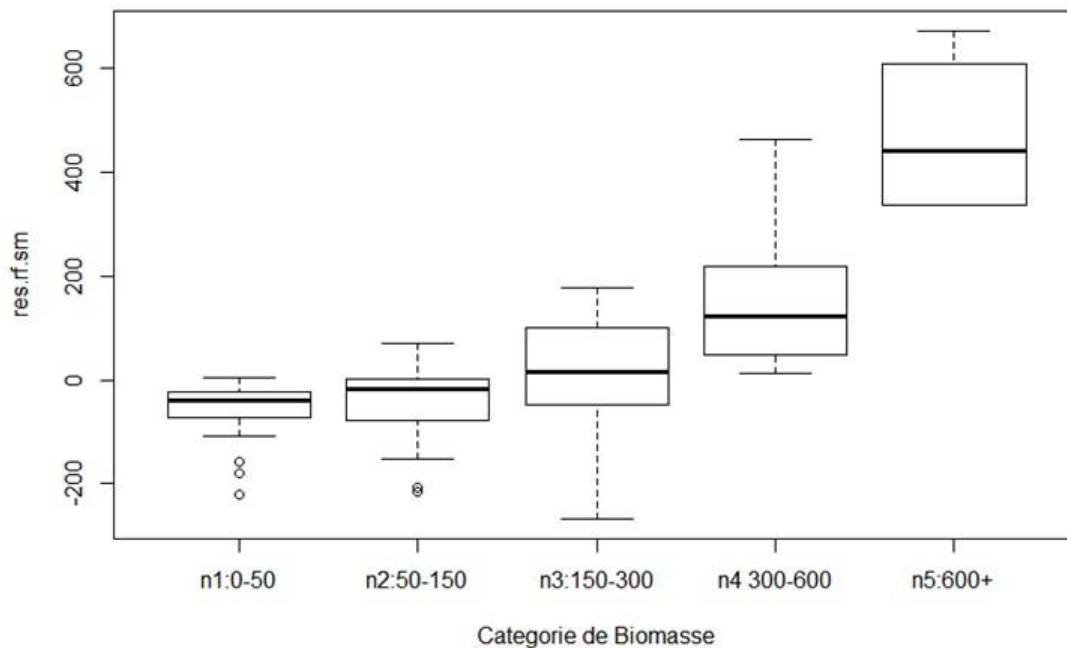


Figure 23 : distribution des résidus (mesurés – prédits) entre les 5 catégorie de biomasse. Un résidu négatif signifie une sur estimation de la prédiction alors qu’un positif signifie une sous-estimation.

Le test de comparaison de la distribution des résidus (mesurés – prédits) entre les 5 catégories de biomasse de la figure 23 ci-dessus montre que la biomasse a tendance à être surestimée entre la catégorie n1, n2, par contre pour les catégories n4 et n5 la distribution est surestimée et elle tend vers zéro sur n3.

3.1.3. Analyse des données au niveau temporel (Dahra 2019 et 2020)

Les modèles obtenus au niveau temporel à la figure 24 et 26 sont issus de la prédiction du poids (frais ou sec) prédit et fonction du poids (frais et sec) mesuré et les résidus en fonction des dates de collecte (figure 25 et 27) à Dahra en 2019 et en 2020.

3.1.3.1. Poids Frais

La figure 24 montre la prédiction du poids frais en fonction du poids frais mesuré, des différentes données vidéos qui sont représentées par chacune des lettres de l'alphabet.

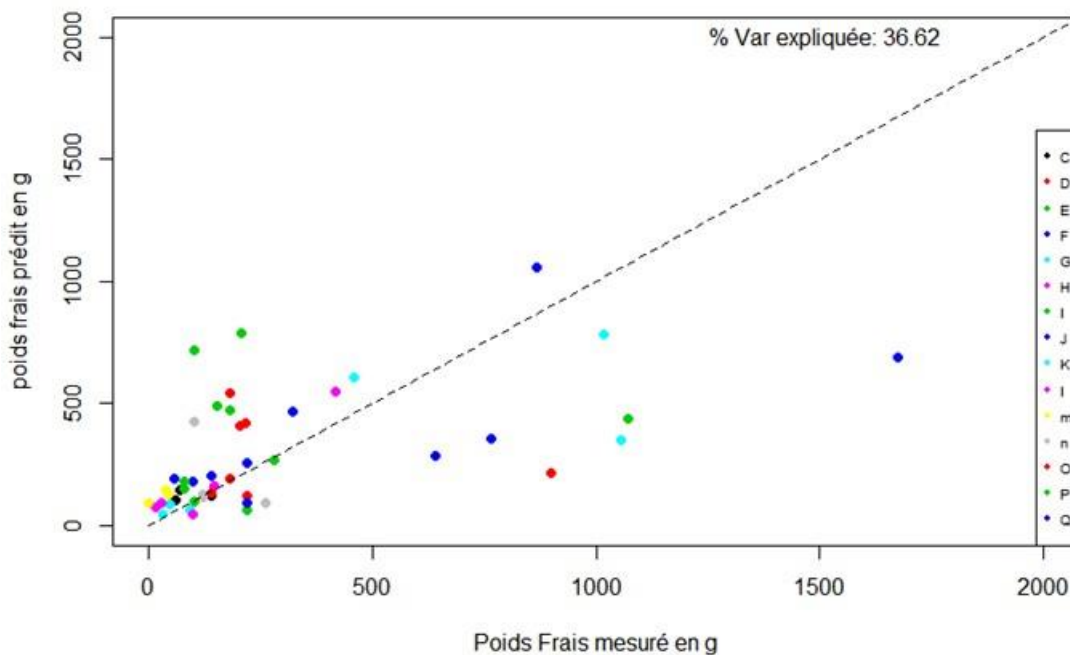


Figure 24: prédiction issue de la random forest en fonction du poids sec sur les données, Les couleurs représentent les différentes dates de collectes

Il ressort de cette prédiction du poids frais prédit en fonction du poids frais mesuré a dates différentes issues de la random forest que la variation est d'environ 36.62%.

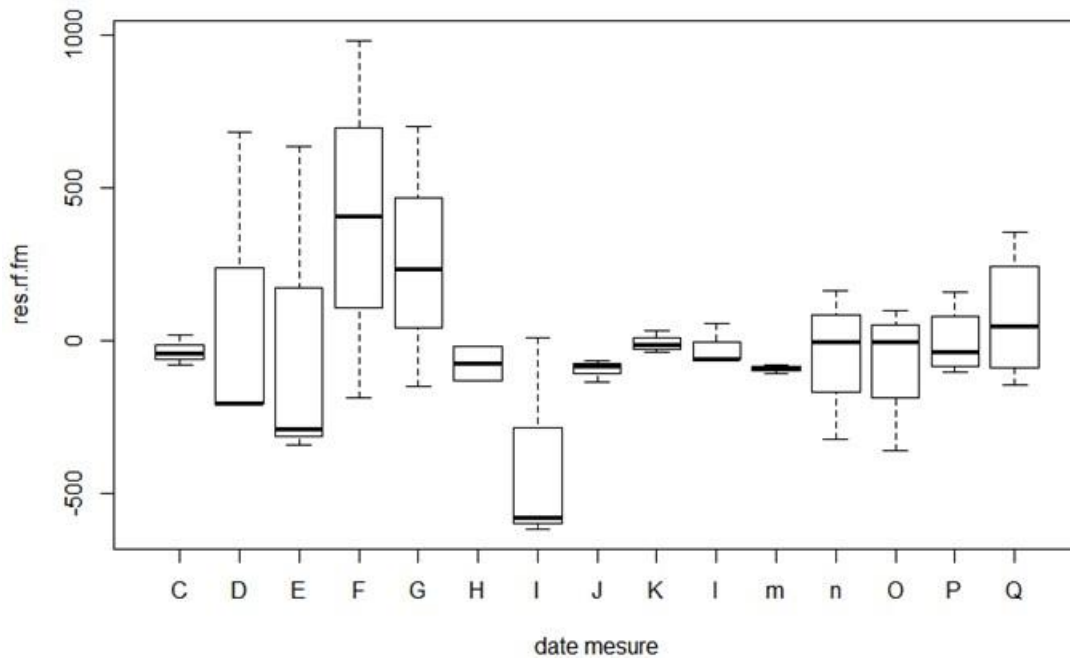


Figure 25: Résidus en fonction des dates de collectes (la saison des pluies de 2019 correspond aux mesures C à H et celui de 2020 des mesures de N à P, la saison sèche de 2019 correspond aux mesures I à m)

La comparaison de résidus en fonction des dates de collecte de la figure 25 ci-dessus montre que les résidus tendent à augmenter au début de la saison et diminuent progressivement en fonction du temps.

3.1.3.2. Poids sec

La figure 26 montre la prédiction du poids sec en fonction du poids sec mesuré.

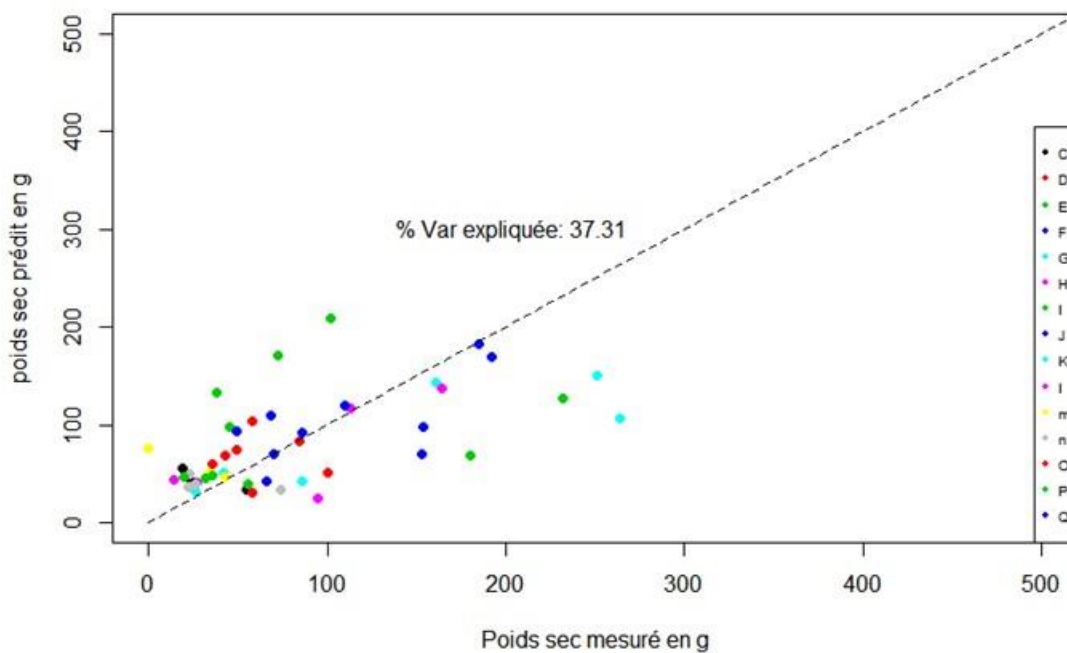


Figure 26: prédiction issue de la random forest en fonction du poids sec sur les données de Dahra, Les couleurs représentent les différentes dates de collectes

Il ressort de cette prédiction du poids frais prédit en fonction du poids frais mesuré à Dahra en différentes dates de collecte issues de la random forest que la variation est d'environ 37,31%.

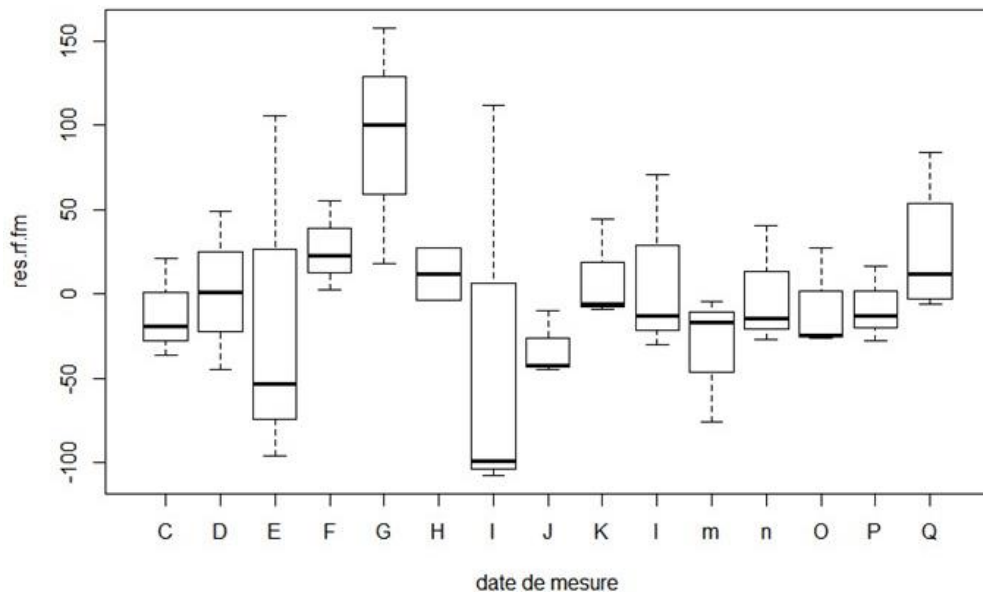


Figure 27: Résidus en fonction des dates de collectes

La comparaison des résidus en fonction des dates de collectes de la figure 27 ci-dessus montre que les résidus au cours du temps : Ils tendent à augmenter au début de la saison et diminuent progressivement en fonction du temps, toutefois on constate des différences entre le début ascendant et le milieu de la saison descendant.

3.1.4. Analyse des données du point de vue spatial

3.1.4.1. Poids frais

Les modèles obtenus au niveau spatial aux figures 28 et 30 sont issus de la prédiction du poids (frais ou sec) prédit et fonction du poids (frais et sec) mesuré et les résidus en fonction de la hauteur moyenne des herbes (figure 29) au niveau national en 2020.

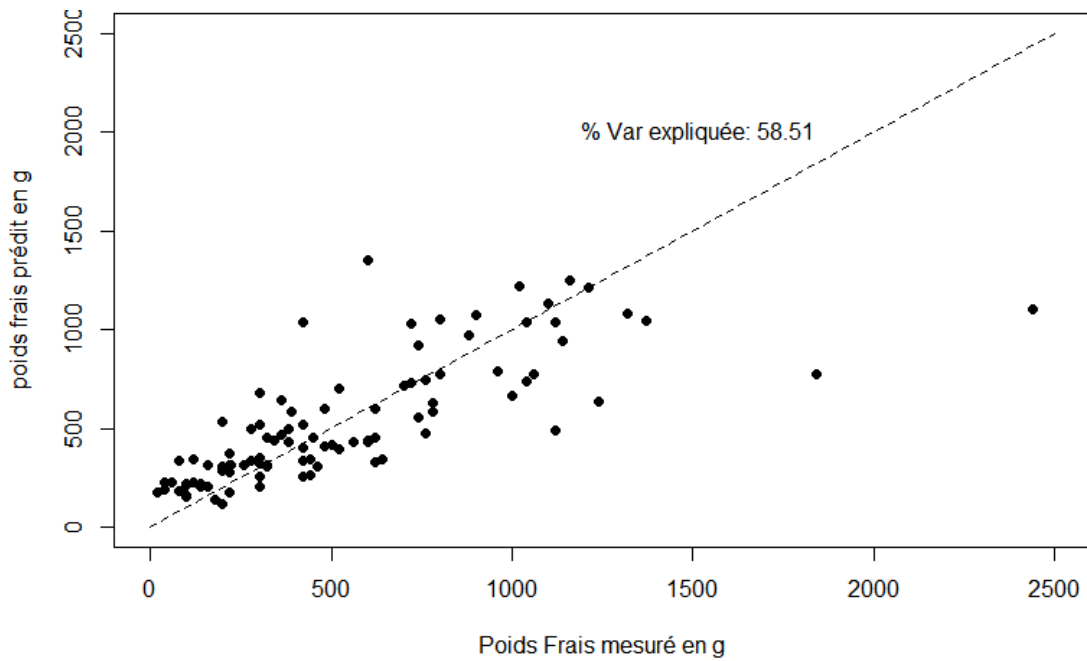


Figure 28: prédiction issue de la random forest en fonction du poids frais sur les données, les différents points représentent les groupes basés sur les relevés botaniques.

Du point de vue spatial, les tests statistiques réalisés, de prédiction issue de la random forest en fonction du poids frais sur les données, montrent que la quantité de poids frais prédits en fonction des espèces botaniques sur le poids frais mesurés est variable a 58,51% (figure 28).

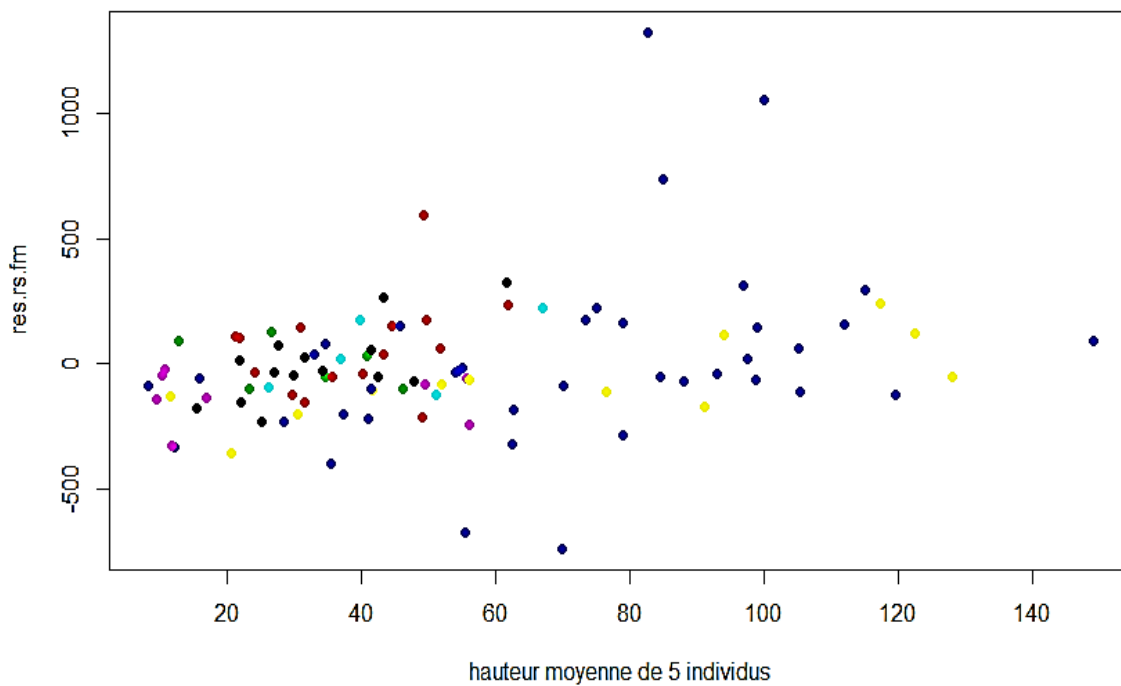


Figure 29: prédiction des résidus en fonction de la hauteur des herbacées

La prédiction résidus en fonction de la hauteur des herbacées n'est donc pas concluante. Il est noté que la prédiction a tendance à être surestimée pour certaines espèces et sous-estimée pour d'autres.

3.1.4.2. Poids sec

La variation de prédiction issue de la random forest en fonction du poids sec sur les données est considérée faible. Une relation linéaire a été établie en se basant sur les estimations poids sec en g estimés et de poids sec mesurés donnent une valeur de 46,86% (figure 30).

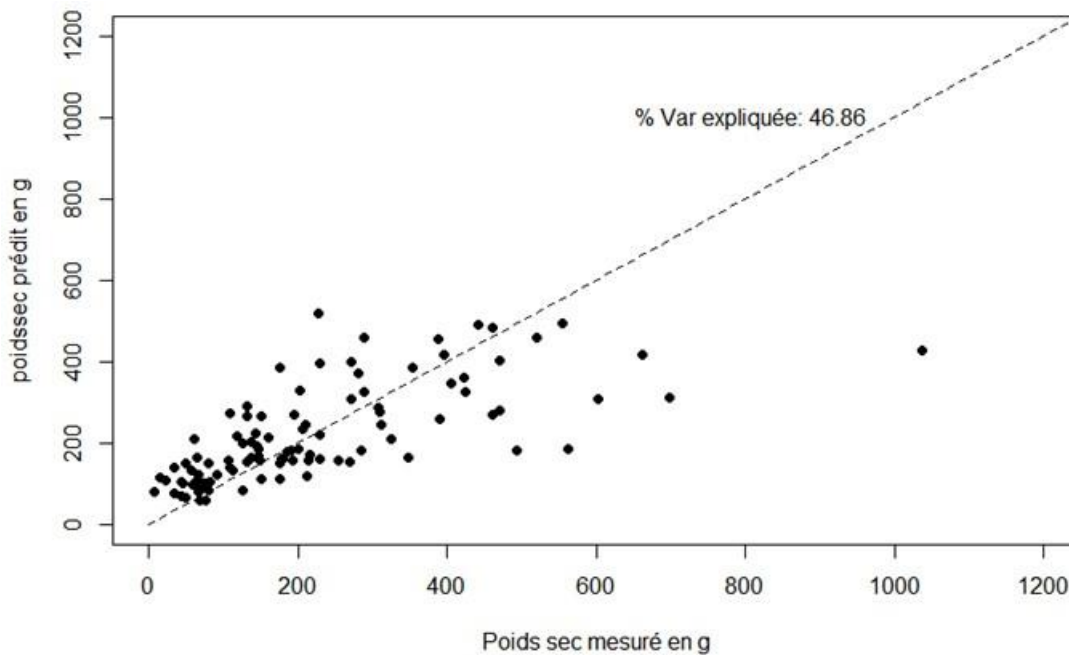


Figure 30: prédiction issue de la random forest en fonction du poids sec sur les données, Les point noirs représentent les différents groupes basés sur les relevés botaniques

3.2.DISCUSSION

L'utilisation de la photogrammétrie pour l'évaluation des caractéristiques de couverts herbacés à partir de modèle numérique est une méthode qui nécessite des études basées sur plusieurs paramètres. Les paramètres utilisés tels que le poids frais, le poids sec, la hauteur du tapis, l'aspect temporel (Dahra) et l'aspect spatial (niveau national) sont les principaux facteurs utilisés pour l'évaluation des caractéristiques du couvert des herbacées.

Toutefois, il existe peu d'études sur l'utilisation des images vidéo en milieu sahélien pour l'étude de la végétation naturelle. La plupart des études scientifiques faites sur la végétation naturelle en Afrique en photogrammétrie, ont été faites en milieu tropical humide (Delley & Chatelain, 2013; Ngabinzeke et *al.*, 2017). De façon générale, les résultats de cette étude ont

montré un bon potentiel d'utilisation de la photogrammétrie par vidéo pour l'évaluation des caractéristiques d'une végétation naturelle sahélienne.

Le traitement des images vidéos à permis de réaliser des structures SfM 3D, l'orthophotographie et le modèle numérique de surface (DSM).

Les estimations de la phytomasse fraîche sur le terrain à partir de vidéos comparées à celle mesurée directement, montrent une prédiction d'environ 54%. Ce qui vérifie la première hypothèse de l'étude selon laquelle il est possible de prédire la biomasse à partir d'une vidéo de l'herbe, traitée via une approche structure from motion. Toutefois, il faut noter que sur les différentes zones de collecte la corrélation de la phytomasse fraîche est soit sous-estimée ou surestimée. Dans ces deux cas cela constitue un paramètre qui influence sur la corrélation bonne ou mauvaise.

Quant aux mesures de poids sec de la phytomasse herbacée, la distribution intra zonale (Dahra et niveau national) des séquences de données est faiblement corrélée (37,31 %). Cela peut expliquer en partie cette différence de sous-estimation et surestimation. En effet, cette forte variabilité est aussi constatée au niveau des résidus en fonction de la hauteur au niveau temporel (Dahra) et spatial (national), des variations pouvant avoir une influence sur la production de biomasse estimée. Les résidus provoquent un biais à la prédiction de phytomasse au cours de la saison. Nous avons ici combiné à la fois des données d'herbe fraîche et des données de paille (saison sèche).

Il est noté aussi que, du point de vue spatial et temporel, un bilan positif des paramètres paysagers associés est noté à 58,51% de corrélation. Ce qui vérifie l'hypothèse selon laquelle la prédiction est la même dans le temps et sur des couverts herbacés variés. Toute fois à une certaine hauteur des individus, les mesures ont tendance à surestimer ou sous-estimer la production potentielle de phytomasse. Il est assimilable à un seuil de saturation si les individus atteignent une certaine hauteur dépassant 1m.

Au vu des résultats de cette étude qui montrent des corrélations positives entre les données du terrain et les données du modèle SfM, il est impérieux de mener des recherches sur cette méthode pour l'évaluation des caractéristiques de couverts herbacés. En effet, la disponibilité des données du terrain et des séries d'images vidéo constitue une belle opportunité pour proposer un modèle combinant les données du terrain et les images vidéo.

CONCLUSION ET PERSPECTIVES

Cette étude a permis de tester l'utilisation de la photogrammétrie et de contribuer ainsi à l'amélioration des méthodes d'évaluation des caractéristiques des couverts herbacés au Sahel en général et au Sénégal en particulier. En effet, la comparaison à partir de l'algorithme random forest réalisée entre les données de biomasse herbacée mesurée sur le terrain et les estimations à l'aide du modèle SFM montre une différence significative. Le modèle SFM surestime la masse herbacée, cela est attesté par les tests paramétriques et non paramétriques, même si les conditions de mesure des données observées présentaient des limites qui favorisent cette conclusion. La corrélation des poids de phytomasse fraîche donne un coefficient de variation de 52 à 58% en fonction du niveau (spatial ou temporelle), tout en étant hautement significative, telle qu'attestée par les résultats.

Un des principaux avantages de l'utilisation de la photogrammétrie pour le suivi de végétation est que les données peuvent être acquises sur une base régulière, répétitive et en utilisant les mêmes longueurs d'onde, de sorte que des comparaisons cohérentes entre les images peuvent être faites. La fréquence d'observation peut être journalière ou bimensuelle. Cependant, la couverture nuageuse (pluie) ou le vent limitent souvent le nombre de mesures ou la qualité des mesures.

Au vu des résultats de cette étude qui montrent des corrélations positives entre les données du terrain et les données du modèle SfM, il est impérieux de mener des recherches sur cette méthode pour l'évaluation des caractéristiques de couverts herbacés car la disponibilité des données du terrain et des séries d'images vidéo constitue une belle opportunité pour proposer un modèle combinant les données du terrain et les images vidéo.

Il est cependant nécessaire de poursuivre les recherches pour améliorer ce modèle en prenant en compte les hauteurs des couverts dépassants 1m, le bilan de phytomasse en fonction de la teneur en carbone de chaque espèce (segmentation des images), et la hauteur de prise de vue des images vidéo avec un dispositif plus stable (robotisé).

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- 1 **Assouma, M. H.** (2016). Approche écosystémique du bilan des gaz à effet de serre d'un territoire sylvo-pastoral sahélien : Contribution de l'élevage. Paris : AgroParisTech, Thèse de doctorat : Ecologie fonctionnelle et sciences agronomiques : AgroParisTechces agronomiques : AgroParisTech, 230 p.
- 2 **Bannari, A., Morin, D., Bonn, F., & Huete, A.** (1996). A review of vegetation indices. *Remote Sensing Reviews*, 13, 95-120 p. <https://doi.org/10.1080/02757259509532298>
- 3 **Bellefontaine, R., Gaston, A., & Petrucci, Y.** (1997). Aménagement des forêts naturelles des zones tropicales sèches (Vol. 32). Food & Agriculture Org, 316 p.
- 4 **Bonfiglioli, A. M.** (1990). Pastoralisme, agro-pastoralisme et retour : Itinéraires sahéliens. vol. 26, no 1-2, p. 255-266.
- 5 **Broge, N. H., & Leblanc, E.** (2001). Comparing prediction power and stability of broadband and hyperspectral vegetation indices for estimation of green leaf area index and canopy chlorophyll density. *Remote Sensing of Environment*, Vol 76(2), 156-172 p. [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(00\)00197-8](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(00)00197-8)
- 6 **Burtch, R.** (2007). History of Photogrammetry. <http://www.ferris.edu/faculty/burtchr/sure340/notes/History.pdf>
- 7 **Casenave, A., & Valentin, C.** (1989). Les états de surface de la zone sahélienne : Influence sur l'infiltration (Centre IRD de Bondy). ORSTOM. 229 p. <http://www.documentation.ird.fr/hor/fdi:27816>
- 8 **Cherel, J.-P.** (2010). Transformation d'images de télédétection. 4 p. http://www.univ-montp3.fr/ateliermercator/wp-content/uploads/2010/03/TRANSFO_IMAGES.pdf
- 9 **Cornet, A., & Rambal, S.** (1981). Simulation de l'utilisation de l'eau par une phytocénose de la zone sahélienne au Sénégal : Test de deux modèles. In *Proceedings of the 9th symposium Informatique et Biosphère on "hydrologie, cycle de l'eau et informatique"* 156-179 p.
- 10 **Delley, N., & Chatelain, C.** (2013). R-Pod, essais en forêt dense ivoirienne avec un drone. *Suisse E-periodica*, 111, 5. <http://dx.doi.org/10.5169/seals-309926>
- 11 **Gueye, S.** (2000). Etude sur les ressources forestières et les plantations forestières du Sénégal période : 1992- 99. Projet GCP/INT/679/EC. CE, FAO.
- 12 **Hirche, A., Salamani, M., BOUGHANI, M., Ratiba, H., Zina, K., Slimani, H., Oukil, Y., & Nedjraoui, D.** (2015). Guide technique écologie pour la collecte, l'analyse des

- données et le calcul des indicateurs écologiques suivant l'approche harmonisée. ROSELT /DNSE. OSS, Tunis, 159 p.
- 13 Lane, S. N., Richards, K. S., & Chandler, J. H.** (1993). Developments in photogrammetry; the geomorphological potential: *Progress in Physical Geography*, 17(3), 306-328 p. <https://doi.org/10.1177/030913339301700302>
- 14 MEDD, N.** (2015). Quatrième rapport national sur la mise en œuvre de la convention sur la diversité biologique. Version finale Août 2015. 89 p. <http://extwprlegs1.fao.org/docs/pdf/sen166823.pdf>
- 15 MEPN.** (1997). Rapport national biodiversité. <https://www.cbd.int/doc/world/sn/sn-nr-01-fr.pdf>
- 16 MEPN, D. des P. N., Programme des Nations Unies pour le Développement, N. (Kenya), & l'Environnement, I. des S.** (2010). Quatrième rapport national sur la mise en oeuvre de la convention sur la diversité biologique. 132 p. <https://www.oceandocs.org/handle/1834/6977>
- 17 Ndiaye, O.** (2015). Déterminants de la dynamique de la végétation d'un milieu pâture en région sahéenne du Sénégal (Doctoral dissertation, Thèse de doctorat en Biologie, Productions et Pathologies Animales. Université Cheikh Anta Diop de Dakar). https://www.ppzs.org/FichiersComplementaires/Th%C3%A8se_Ousmane.pdf
- 18 Ndiaye, O.** (2019). DynaVeg (Coop Danoise) 2018-2021. <https://www.ppzs.org/projets/encours/dynaveg>
- 19 Ngabinzeke, J. S., Linchant, J., Quevauvillers, S., Muhongya, J.-M. K., Lejeune, P., & Vermeulen, C.** (2017). Cartographie de la dynamique de terroirs villageois à l'aide d'un drone dans les aires protégées de la République démocratique du Congo. *BOIS ET FORÊTS D ES TROPIQUES*, 4(330), 69-83. <http://revues.cirad.fr/index.php/BFT/article/view/ID-BFT-160617>
- 20 Pamart, A., Abergel, V., Flammin, A., Morineau, C., Paitier, H., Schmitt, A., & Sorin, S.** (2019). Synthèse des outils et des technologies 3D. <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-02159453>
- 21 Picard, N., Magnussen, S., Ngok Banak, L., Namkossereana, S., & Yalibanda, Y.** (2010). Permanent sample plots for natural tropical forests : A rationale with special emphasis on Central Africa. *Environmental Monitoring and Assessment*, 164(1-4), 279-295. <https://doi.org/10.1007/s10661-009-0892-y>
- 22 Pix4Dmapper.** (2019). Pix4Dmapper—Pix4D SA: Lausanne, Switzerland. studioSPORT. <https://www.studiosport.fr/pix4dmapper-pix4d-a15808.html>

- 23 Possoch, M., Bieker, S., Hoffmeister, D., Bolten, A., Schellberg, J., & Bareth, G.** (2016). Multi-temporal crop surface models combined with the RGB vegetation index from UAV-based images for forage monitoring in grassland. *ISPRS - International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XLI-B1, 991-998 p. <https://doi.org/10.5194/isprsarchives-XLI-B1-991-2016>
- 24 Smith, M., Carrivick, J., & Quincey, D.** (2015). Structure from Motion Photogrammetry in Physical Geography. *Progress in Physical Geography*, 40, 247-275 p. <https://doi.org/10.1177/0309133315615805>
- 25 Snavely, N., Seitz, S. M., & Szeliski, R.** (2008). Modeling the World from Internet Photo Collections. *International Journal of Computer Vision*, 80(2), 189-210 p. <https://doi.org/10.1007/s11263-007-0107-3>
- 26 Sow, R. S., Denis, J. P., Trail, J. C. M., Thiongane, P. I., Mbaye, M., & Diallo, I.** (1988). Productivité du zébu Gobra au centre de recherches zootechniques de Dahra (Sénégal). *Etude et document*, 1(2), 45.
- 27 Srinivas, P., Das, B., Saibaba, J., & Krishnan, R.** (2004). Application of Distance Based Vegetation index For Agricultural Crops Discrimination. In XXth ISPRS Congress, Commission (Vol. 7).
- 28 Thiombiano, A., Glèlè Kakai, R., Bayen, P., Mahamane, A., & Boussim, J. I.** (2016). Méthodes et dispositifs d'inventaire forestiers en Afrique de l'Ouest : Etat des lieux et propositions pour une harmonisation. *Annales des sciences agronomiques -spécial Projet Undesert-UE*, 20(15-31), 34.
- 29 Universalis, E.** (2020). SÉNÉGAL. *Encyclopædia Universalis*. <https://www.universalis.fr/encyclopedie/senegal/>
- 30 UVED, U.** (2008). Les indices de végétation. <https://e-cours.univ-paris1.fr/modules/uvved/envcal/html/vegetation/indices/index.html>
- 31 Vries, F. W. T. P. de, & Djitèye (Éds.).** (1982). La productivité des pâturages sahéliens : Une étude des sols, des végétations et de l'exploitation de cette ressource naturelle. PUDOC, Wageningen. *Agric. Res. Rep.*, 525p.

ANNEXE

Annexe1 : Traitement sur QGIS

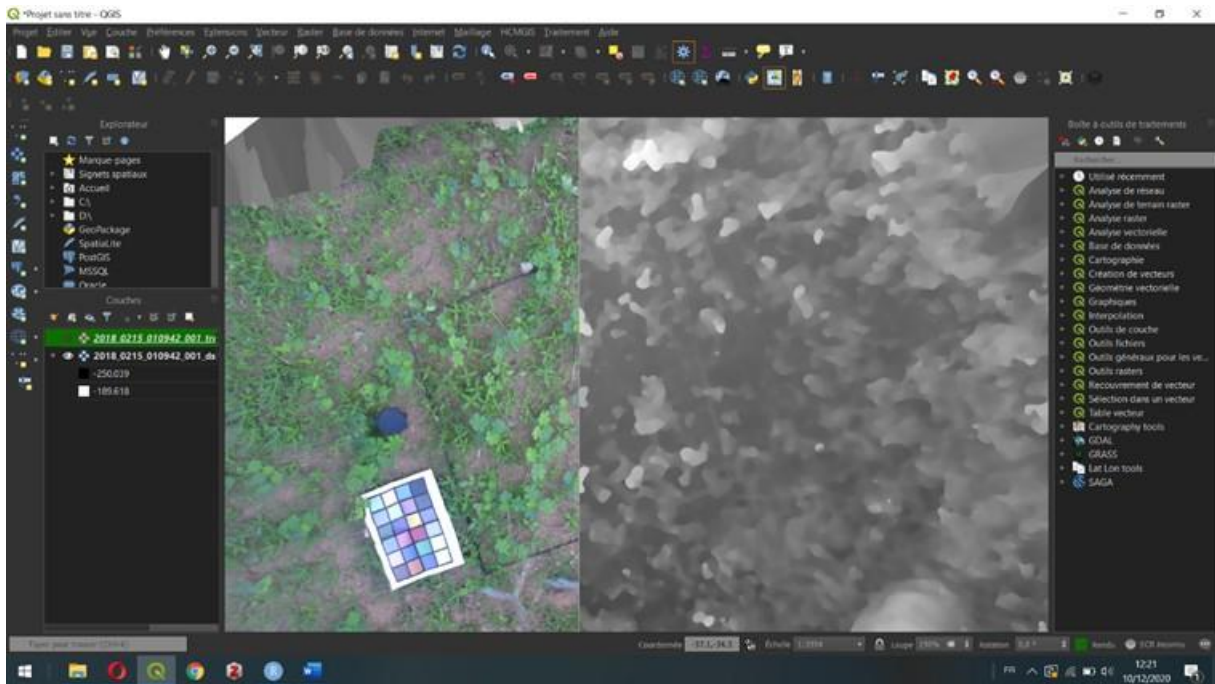


Figure 31: Apparence DSM et Ortho mosaïque sur QGIS